

2.6 Ciclo hidrológico y recursos hídricos

Coordinadores: Santiago Beguería (EEAD-CSIC)

Autores: Santiago Beguería, Estación Experimental de Aula Dei (EEAD-CSIC), Zaragoza; Yvan Caballero, BRGM; Enrique Navarro, Instituto Pirenaico de Ecología (IPE-CSIC), Zaragoza; Marilen Haver, EcoLab, UMR5245 CNRS – Université de Toulouse; Anne Zabaleta, UPV/EHU, Bilbao; Luis Javier Lambán Jiménez, Instituto Geológico y Minero de España (IGME), unidad de Zaragoza.

RESUMEN

Los Pirineos tienen una importancia fundamental para los recursos hídricos de los territorios situados a ambos lados de la divisoria hidrológica, ya que en sus cabeceras se genera una parte muy importante de los caudales superficiales y aguas subterráneas que son utilizadas aguas abajo en las cuencas del Ebro, Adour, Garona, etcétera.

El análisis de las series temporales de caudales circulantes muestra una tendencia general a la disminución de los caudales medios anuales a lo largo de las últimas décadas. Esta disminución sólo se puede atribuir de forma parcial al cambio climático, siendo también muy importante el efecto de los cambios en los usos del suelo y en la vegetación, sobre todo en la parte meridional de la cordillera. También se han observado cambios en el régimen mensual, relacionados con una disminución de la relación nieve / lluvia en invierno, menor acumulación de nieve, y una aceleración de la fusión, que se han traducido en cambios en los regímenes de los ríos, que transitan hacia regímenes de tipo pluvial con mayores caudales invernales, adelanto y disminución de los caudales de deshielo primaverales, y estiajes más largos e intensos. No se han encontrado, en el estudio de los registros de las últimas décadas, señales claras de cambio en la frecuencia de caudales extremos.

La mayoría de los modelos climáticos pronostican para la región pirenaica aumentos de las temperaturas y una disminución de las precipitaciones a lo largo del siglo XXI. Estos cambios incrementarían el estrés sobre la vegetación, resultando en una evapotranspiración más elevada que a su vez afectaría a los demás componentes del balance hidrológico (escorrentía superficial y recarga). Con todo ello, el contenido de agua en el suelo disminuiría, las condiciones de saturación serían cada vez más escasas y se limitarían a ciertos períodos en invierno y primavera. Además de los cambios en el forzamiento climático, el balance hidrológico

Como muchos otros sistemas montañosos los Pirineos son una auténtica torre de agua para los territorios que lo rodean, ya que en ellos tienen su origen una parte muy importante de los recursos hídricos superficiales y subterráneos que se utilizan aguas abajo en las cuencas de los ríos Ebro, Bidasoa, Adour, Garona, cuencas internas catalanas (sistemas Norte y Centro) y Aude. Por ejemplo, los ríos pirenaicos suponen el 70% de las aportaciones totales al río Ebro (Confederación Hidrográfica del Ebro). Los recursos hídricos generados en los Pirineos son pues fundamentales para la agricultura de regadío y la producción de alimentos, para la producción de energía hidroeléctrica, para la industria, y para el abastecimiento doméstico no solo de las poblaciones de los Pirineos, sino de un territorio mucho más amplio que incluye a millones de habitantes y algunas de las concentraciones urbanas más importantes de la región. Cualquier cambio que afecte al ciclo hidrológico de los Pirineos, por tanto, es susceptible de tener repercusión sobre un territorio y una población mucho más amplios.

Una planificación adecuada de los recursos hídricos de los Pirineos requiere comprender los pormenores de su balance hidrológico, es decir de cómo se reparte el agua precipitada entre evapotranspiración (agua que retorna a la atmósfera en forma de vapor, ya sea

de los Pirineos se verá afectado por cambios en la cubierta vegetal, que se caracterizarán por una continuación de los procesos de revegetación ya existentes en las últimas décadas del siglo XX como consecuencia del abandono de las actividades agropecuarias y del calentamiento que conllevará una migración de los pisos altitudinales, mientras que es altamente probable que la presión humana se incremente en unos pocos lugares como estaciones de esquí y urbanizaciones turísticas y de segunda residencia.

Estos cambios en los caudales anuales y estacionales pueden conllevar una disminución en la calidad de las aguas, ya que implican un descenso del efecto de dilución de las sustancias contaminantes. El escenario que plantean los diferentes estudios analizados es por tanto de una exacerbación de las tendencias observadas en la actualidad, conducente a una menor disponibilidad de recursos hídricos. Por el lado de la demanda, si bien se constatan y se prevén mejoras en la eficiencia en la distribución y uso del agua, existen también previsiones de incremento de la demanda agrícola por el desarrollo de nuevas zonas de agricultura de regadío, lo que unido a lo anterior puede llevar a un aumento de las tensiones y la competencia por los recursos hídricos.

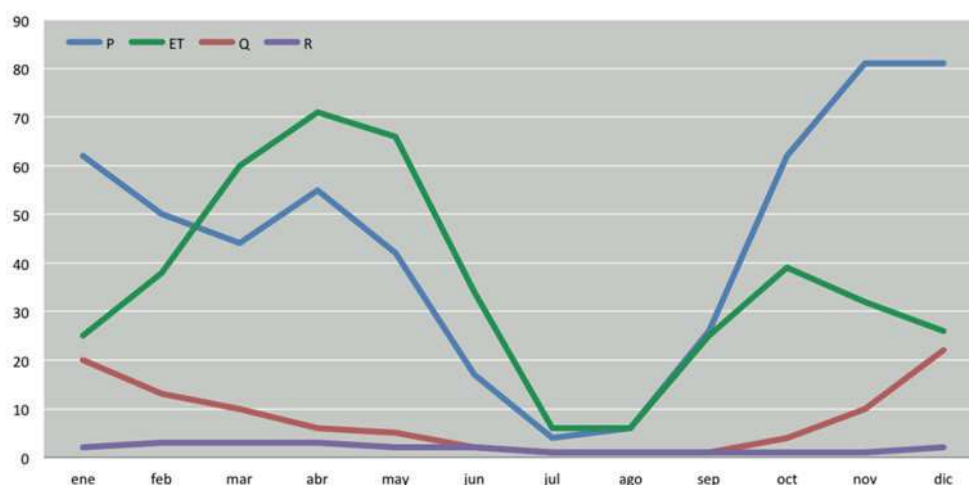


Figura 2.6.1. Balance hidrológico mensual típico de una cuenca de clima mediterráneo, con indicación de las entradas por precipitación (P), las salidas por evapotranspiración (ET), el caudal superficial (Q) y la recarga (R). Unidades: l m-2. Fuente: Beguería et al., 2015.

como evaporación directa o a través de la transpiración de las plantas), generación de escorrentía superficial y recarga de acuíferos. Estos procesos, a su vez, determinan los volúmenes de agua en las distintas masas de agua superficiales (ríos, lagos) y subterráneas, y en otras partes del sistema como en el manto glaciar y nival, humedad del suelo, en turberas y otras zonas encharcadas, o en la propia vegetación. La Figura 1 muestra a modo de ejemplo la evolución mensual de los distintos componentes del balance hidrológico en una cuenca forestal con un clima de tipo mediterráneo. En el reparto de la precipitación entre los distintos flujos de salida, destaca por su importancia la evapotranspiración, que puede representar desde el 40% (Gipuzkoa, río Garona) hasta el 80% del total (cuencas más mediterráneas). El excedente resultante, hasta completar el total de agua precipitada, se reparte entre generación de caudal superficial y recarga. El desfase entre los distintos flujos (nótese por ejemplo que la evapotranspiración llega a superar en cantidad a la precipitación en algunos meses) se debe a la existencia de reservas internas de agua, por ejemplo en el suelo. En las cuencas de montaña, además, otra importante reserva de agua que produce un desacople entre el régimen de las precipitaciones y el de los caudales es la formación y fusión anual del manto de nieve. La mayoría de los modelos climáticos pronostican para los Pirineos un aumento de la temperatura y una disminución de las precipitaciones a lo largo del siglo XXI. Estos cambios conllevarían un incremento del estrés sobre la vegetación en los periodos más secos del año o durante épocas de escasez (sequías), mientras que por otro lado adelantarían en el año y prolongarían el periodo de crecimiento. Todo ello resultaría en una evapotranspiración más elevada, que a su vez afectaría

a los demás componentes del balance hidrológico (escorrentía superficial y recarga subterránea). El incremento de la temperatura también supondría una disminución en la aportación en forma de nieve, y una aceleración de la fusión. Con todo ello, el contenido de agua en el suelo disminuiría, las condiciones de saturación serían cada vez más raras y se limitarían a periodos en invierno y primavera. Numerosos estudios coinciden en la importancia de todos estos cambios en el balance hídrico para los recursos hídricos (ACA, 2009; García-Ruiz et al., 2011).

Además de los cambios en el forzamiento climático, el balance hidrológico de los Pirineos se verá afectado por cambios en la gestión de los usos del suelo, que se caracterizarán por una continuación de procesos ya constatados desde las últimas décadas del siglo XX hasta la actualidad como la expansión de bosques y monte bajo como consecuencia del abandono de las actividades agropecuarias. A esta tendencia se une una creciente presión humana localizada en unos pocos lugares como estaciones de esquí y urbanizaciones turísticas y de segunda residencia.

Los escenarios futuros para los recursos hídricos de los Pirineos prevén disminuciones en la cantidad total de recursos disponibles, sobre todo en forma de caudal superficial, que pueden ser de distinta magnitud según el estudio. Además, todos ellos coinciden en que habrá cambios importantes en el régimen mensual de los caudales, con un incremento de los caudales invernales y un descenso de los máximos primaverales debidos a la fusión nival más temprana, así como estiajes más severos y prolongados.

Por otro lado, en las previsiones de demanda para la mitad del siglo XXI contrasta la estabilidad o incluso descenso de algunas demandas como el abastecimiento urbano o industrial debido a la mejora de la eficiencia de los sistemas de distribución y consumo, con los planes de expansión del regadío agrícola registrados en algunos planes hidrológicos de cuenca como el de la cuenca del Ebro (465.000 hectáreas más para el periodo 2016-2021, que se añadirían a las 900.000 hectáreas actuales; Plan Hidrológico del Ebro 2015-2021).

Todos estos cambios tanto en la disponibilidad de recursos como en la evolución de las demandas conllevarán una mayor incertidumbre en la disponibilidad de recursos hídricos en los Pirineos y aguas abajo, lo que acentúa la necesidad de plantear medidas de adaptación. En este capítulo abordaremos las cuestiones siguientes:

- ¿Cuáles son las tendencias de la evolución de los recursos hídricos superficiales y subterráneos de los Pirineos observadas en las últimas décadas?
- ¿Cuáles son las previsiones de evolución de los recursos hídricos a lo largo de este siglo, y cuál es su grado de confianza?
- ¿Qué consecuencias tendrán los cambios en el ciclo hidrológico de los Pirineos sobre la calidad de las aguas, los ciclos biológicos y los ecosistemas asociados a las masas de agua?
- ¿Cómo podemos remediar estas consecuencias? Para responder a estas cuestiones contamos, fundamentalmente, con dos aproximaciones metodológicas:
 - Aproximación estadística. El análisis de series temporales suficientemente largas de las principales variables del balance hidrológico (precipitaciones, temperaturas, caudales circulantes) permite determinar la existencia de tendencias temporales. Este método, que podríamos llamar retrospectivo, nos debe también permitir discriminar la causa de las variaciones observadas, es decir la relación con el forzamiento climático o con otras causas como los cambios en los usos del suelo. Aproximación de modelización. Utilizando modelos de simulación numérica del sistema hidrológico calibrados durante el periodo de observación es posible analizar los efectos de distintos escenarios futuros en los que cambien las características del forzamiento climático, los usos del suelo, la gestión de los recursos hídricos, etcétera. Podríamos hablar por tanto de un método prospectivo, que nos permite

estimar cuáles pueden ser las consecuencias de distintos escenarios futuros sobre los distintos componentes del balance hidrológico y sobre la disponibilidad de recursos hídricos.

2.6.1 Cambios en las aguas superficiales: aportación anual

La evidencia empírica, a través del estudio de las series instrumentales de la red foronómica (estaciones de aforo), muestra señales de cambio en las aportaciones medias anuales de los ríos de los Pirineos en las últimas décadas. García-Ruiz et al. (2001) constataron un descenso estadísticamente significativo de las aportaciones anuales en 28 de 31 estaciones de aforo del Pirineo central español, para el periodo 1964-1994. Más recientemente, Vicente-Serrano et al. (2015) encontraron descensos también significativos en los principales ríos del Pirineo oriental español. López-Moreno et al. (2010), analizando la totalidad de la cuenca del Ebro sobre el periodo 1950-2010, encontraron descensos significativos de caudal en 55 de 88 estaciones de aforo. En los Pirineos franceses, el informe Acclimaterra (Le Treut, 2013) señala un descenso de entre el 25 y el 30% para el río Garona en su desembocadura para el periodo 1959-2010, aunque a esta escala de trabajo es difícil aislar la influencia de los cambios en los usos consuntivos del agua, que también han variado durante el mismo periodo. Un estudio reciente (Zabaleta et al, 2017; IHOBE, 2017) realizado en ambos lados de los Pirineos en su terminación occidental (Golfo de Bizkaia) con caudales diarios de 18 estaciones para el periodo 1955-2015 (60 años) y de 43 estaciones para el 1975-2015 (40 años) muestra también una tendencia a la disminución de los caudales. Para un periodo más breve (1995-2015, 20 años), y utilizando 117 estaciones, el mismo estudio indica una tendencia de incremento de los caudales anuales en algunos puntos. En el extremo oriental (sub-cuencas pirenaicas de los ríos Têt y Tech), Lespinas et al. (2009; 2014) detectaron también tendencias a la disminución de los caudales anuales. La atribución de estos descensos en las aportaciones de los ríos, es decir la identificación de sus causas y sobre todo la discriminación entre causas climáticas y no climáticas, han sido abordados en estos y otros trabajos. En general, los autores de estos trabajos destacan que el análisis de la evolución de las principales variables climáticas (precipitación y temperatura) no justifica completamente la alteración observada en los caudales. Es decir, si se elimina la influencia del clima sobre los caudales, éstos siguen presentando una tendencia negativa (Figura 2). Excluyendo la causa climática, existe un consenso en atribuir esta variación al incremento en la evapotranspiración debido a los cambios en la cubierta vegetal como respuesta a los cambios en los

usos del suelo. Hay que tener en cuenta que cambios pequeños en la evapotranspiración, de en torno a un 2 o 3%, tienen repercusiones muy importantes sobre el balance hídrico total, ya que la evapotranspiración representa un porcentaje muy elevado del balance. Beguería *et al.* (2003) cifraron este descenso de los caudales debido a la revegetación en torno a un 25% para todo el periodo 1945-1995

(Figura 2.6.2). Gallart y Llorens (2003 y 2004) estimaron, para toda la cuenca del Ebro, un descenso del caudal anual del 0.63% por año, que atribuyeron en un 30% al incremento de la evapotranspiración en la cuenca debido a la revegetación en las zonas de cabecera. En las cuencas del Noguera-Pallaresa y Ribera Salada, Buendía *et al.* (2016) atribuyeron el descenso observado en los caudales a la acción conjunta del cambio climático y la reforestación. En la vertiente francesa, el estudio a escala europea de Stahl *et al.* (2010) detectó también tendencias decrecientes en dos cuencas para los periodos 1952-2004 y 1962-2004.

La utilización de modelos de simulación hidrológica permite validar esta hipótesis, así como estimar la evolución de las aportaciones anuales en distintos escenarios de cambio climático. Así, López-Moreno *et al.* (2014) estimaron, para la vertiente sur de los Pirineos

y el horizonte de 2050, que los cambios climáticos proyectados causarían una disminución de los caudales anuales de entre el 10 y el 20% con respecto al periodo 1970-2000, dependiendo de la cuenca estudiada (La Confederación Hidrográfica del Ebro ha estimado este descenso en el 5% como media, para el año 2027 y la totalidad de la cuenca (CHE, 2015). Quintana-Seguí *et al.* (2010), para los ríos pirenaicos de la cuenca de Rhône-Alps, estimaron un descenso de los caudales anuales de entre el 10 y el 20% para el periodo 2035-2065 con respecto al periodo 1970-2000. Pascual *et al.* (2014) estimaron reducciones de las aportaciones anuales entre el 25 y el 34% en las cuencas catalanas para el último cuarto del siglo XXI, y Manzano (2009) estima esta reducción en un 10% para 2040. Candela *et al.* (2012), para un horizonte de 2050, estiman descensos del 20% en los caudales asociados a los descensos de precipitación, y estiman también una disminución en la recarga de los acuíferos del 18%. Caballero *et al.* (2007), para el río Ariège, han estimado un descenso del 20% en los caudales anuales y estacionales para el periodo 2055-2065, con respecto al periodo de referencia 1985-1995. Las simulaciones realizadas en cuencas de cabecera de los embalses del Zadorra en el Golfo de Vizcaya indican una disminución de los caudales anuales entre 8 y 15 % para el año 2060, con relación al periodo 1961-2000 (IHOBE, 2017; Meaurio, 2017).

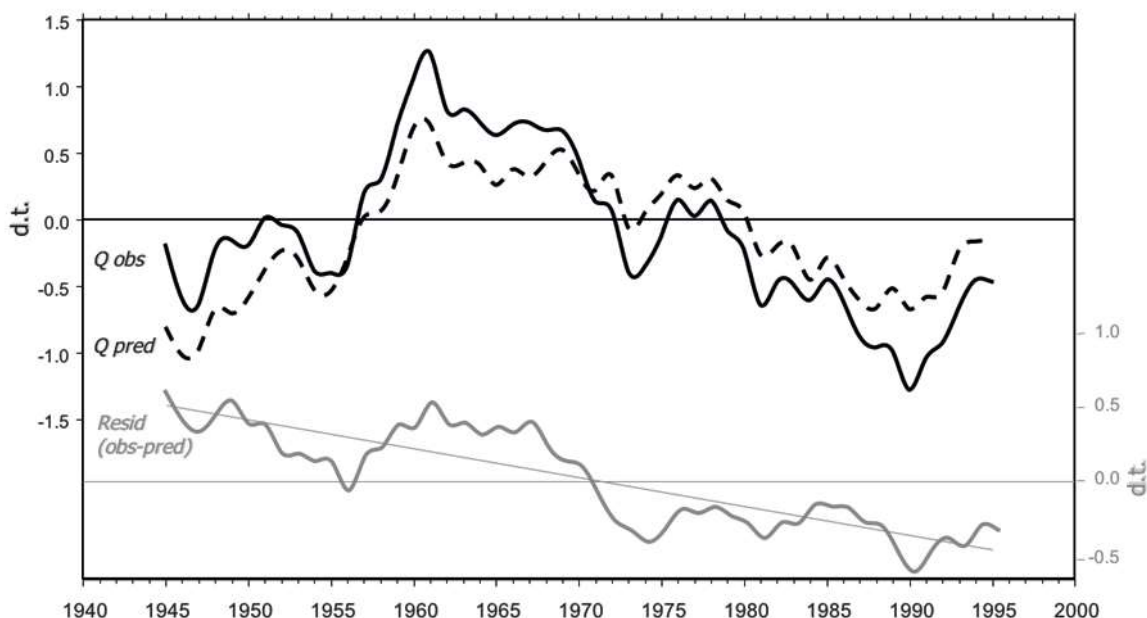


Figura 2.6.2. Evolución de las aportaciones anuales de los ríos de los Pirineos centrales españoles (Q_{obs}) y de los caudales teóricos a partir sólo de los datos climáticos (Q_{pred}). El residual o diferencia entre caudales predichos y observados ($Resid$) muestra una evolución descendente de los caudales que no queda explicada por la variabilidad climática, y que se atribuye al incremento de la evapotranspiración debido a los cambios de uso y de vegetación. Fuente: adaptado de Beguería *et al.*, 2003.

2.6.2 Cambios en las aguas superficiales: régimen mensual

Los cambios en el régimen mensual de los caudales han sido también objeto de estudio. En general, el incremento de las temperaturas augura una menor frecuencia de los episodios de nieve, a favor de las precipitaciones lluviosas. En consecuencia, mayores temperaturas conllevan un incremento de las precipitaciones líquidas en invierno, que ya se ha constatado en algunos estudios. Por ejemplo, López-Moreno (2005) documentó un descenso en la acumulación invernal de nieve en el Pirineo español en el periodo 1950-1999. La principal consecuencia para los caudales es un incremento de los caudales invernales, unida a un adelantamiento de la época de fusión en primavera. Por el contrario, los caudales estivales acusaron los descensos más importantes. Esta tendencia se confirma en otros estudios basados en datos observados, como los de García-Ruiz *et al.* (2001) o Stahl *et al.* (2010). Para el Golfo de Vizcaya, Zabaleta *et al.* (2017) documentaron una tendencia a la disminución de caudales en otoño al menos desde 1955, tratándose esta de la estación que acusa esta tendencia con más claridad, implicando una prolongación del periodo estival. El análisis de tendencias en series de caudal en el Pirineo francés se ha centrado en el estudio de los caudales de estiaje. El estudio de Giuntoli y Renard (2010) describe tendencias negativas generalizadas de las aportaciones en periodo de estiaje para el periodo 1968-2008, y el informe Acclimaterra (Le Treut, 2013) identifica también tendencias negativas en los caudales de estiaje en el caso del Adour.

Los trabajos utilizando modelos de simulación y escenarios de clima futuro muestran un incremento de estas tendencias, con una reducción importante de la acumulación de nieve que en el último cuarto del siglo XXI podría llegar a ser del 78% por debajo de los 1500 m de altura (López-Moreno *et al.*, 2009). Las consecuencias sobre el régimen de los ríos podrían ser especialmente acusadas en primavera, donde podrían darse descensos notables en los caudales y un adelantamiento en algunos casos del pico de fusión nival, y también en los estiajes (que se acentuarían), mientras que los caudales invernales se mantendrían en valores similares a los actuales (Figura 2.6.3). El efecto combinado del cambio climático y de los usos del suelo acentúa estos cambios.

En la vertiente francesa, Boé *et al.* (2009) utilizaron un conjunto de escenarios climáticos junto con un modelo de simulación hidrológica, y describen una evolución similar del régimen anual en los ríos Ariège y Garonne (Figura 3.1.4). Comparando el periodo 2046-2065

con el periodo de referencia 1970-1999, encuentran reducciones generales del caudal que son más marcadas en primavera y comienzos de verano debido al efecto combinado de menores precipitaciones, mayor evapotranspiración y una reducción del manto nival. Por el contrario, los caudales de invierno muestran poca variación con respecto al periodo de referencia (Garonne), o incluso se incrementan (Ariège), debido a una mayor frecuencia de episodios de lluvia con respecto a los episodios de nieve. La simulación de Caballero *et al.* (2007) cifra en cerca del 50% la reducción de la precipitación en forma de nieve en la cuenca de Adour-Garonne para el horizonte de 2050-2060, con respecto al periodo de referencia 1985-1995. Las consecuencias serían un incremento de los caudales invernales y adelanto del pico primaveral, con reducciones de caudal durante el verano de un 11%.

2.6.3 Cambios en las aguas subterráneas y en las surgencias

Los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos subterráneos y su evolución futura son más complejos de evaluar que en el caso de las aguas superficiales, debido a la gran variedad de contextos geológicos en los que se encuentran (Martín-Vide, 2016). En efecto, el comportamiento de las aguas subterráneas con respecto a los forzamientos climáticos dependen fuertemente del tipo de formaciones geológicas (acuíferos) en los que se encuentran, de su grado de confinamiento (un acuífero en el cual el agua fluye libremente se comportará de forma muy distinta a otro acuífero en el cual el agua se encuentra a presión, cautiva bajo una formación poco permeable), de sus interacciones hidráulicas con los acuíferos vecinos (como el agua marina en el caso de los acuíferos costeros), así como de la intensidad de la explotación por bombeo que soporte el acuífero (Green *et al.*, 2011). Las zonas de alta montaña son muy sensibles a cualquier cambio en el balance hidrológico y, en consecuencia, en la recarga y funcionamiento de los acuíferos. Para evaluar adecuadamente la recarga en áreas de alta montaña, hay que tener en cuenta una serie de características específicas como la existencia de efectos asociados a los relieves abruptos y a las grandes altitudes o la presencia de importantes gradientes geográficos de temperatura y sus consecuencias en la vegetación, suelos y precipitación. Además, estos ambientes se caracterizan por la presencia de manantiales a diferentes altitudes. Tanto la recarga como la descarga se encuentran frecuentemente controladas o condicionadas por la dinámica nival. Otra característica no menos importante de las áreas de alta montaña es la dificultad de acceso y, por lo tanto, de toma de datos, que dificultan nuestro conocimiento

2.6 Ciclo hidrológico y recursos hídricos

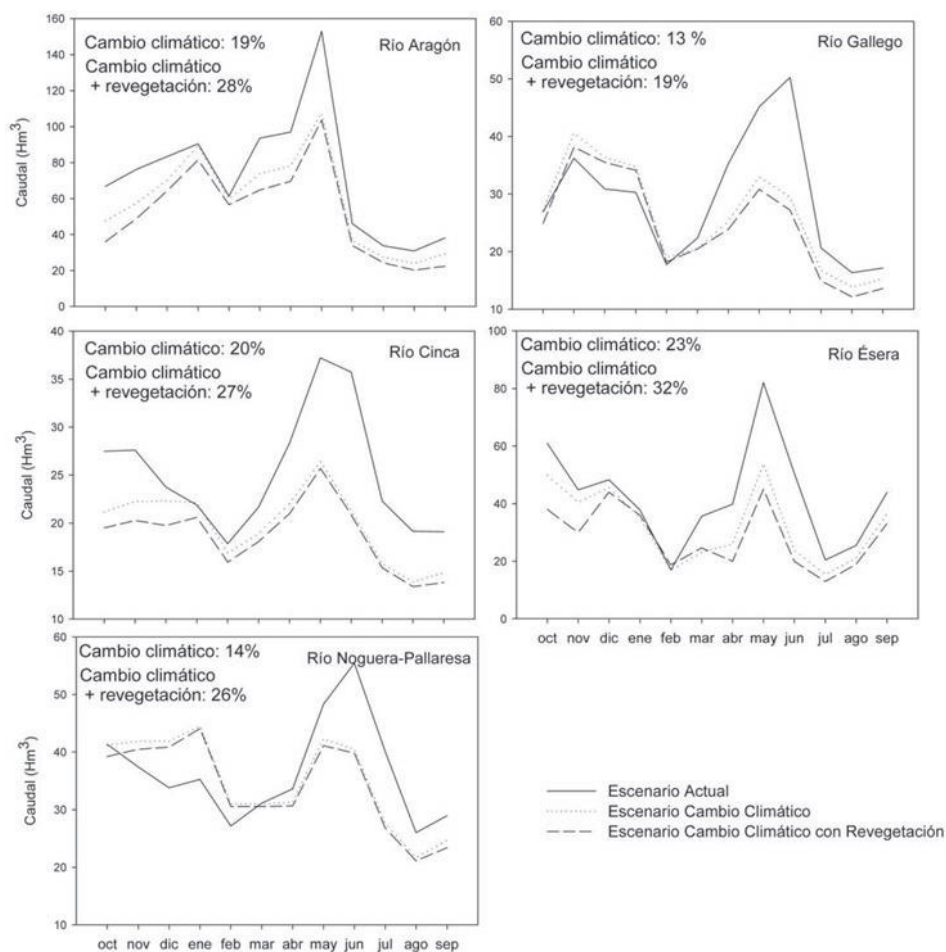


Figura 2.6.3 Variaciones en el régimen de algunos ríos de los Pirineos en el año 2050 con respecto al régimen medio del periodo 1970-2000, para escenarios de cambio climático y de cambio climático con revegetación. (Fuente: adaptado de López-Moreno et al., 2014.)

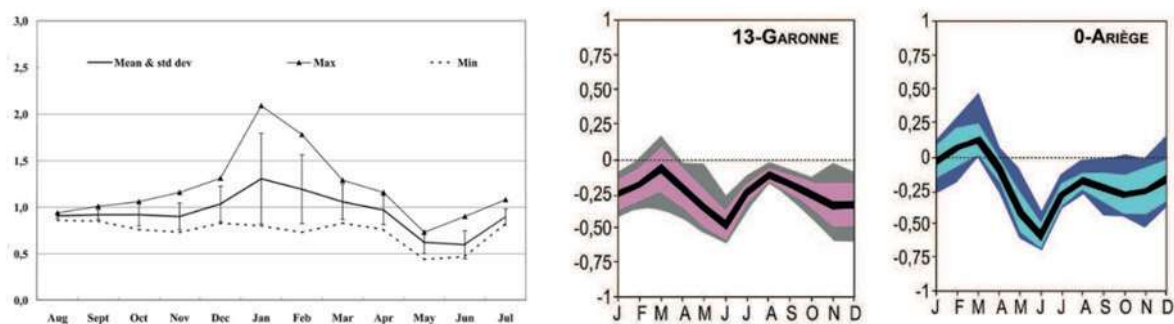


Figura 2.6.4. Variación relativa del régimen de los ríos Garonne en Foix (2055-2065 con respecto a 1985-1995); Garonne en Lamagistère y Ariège en Foix (2046-2065 con respecto a 1970-1999). (Fuente: Caballero et al., 2007; Boé et al., 2009.)

sobre el funcionamiento de los acuíferos.

La respuesta de las áreas de alta montaña ante el posible calentamiento climático y los cambios globales es una cuestión relevante. Con el incremento en la temperatura global se prevé que disminuya la precipitación en forma de nieve y que se adelante en el año el periodo de fusión. Con estos efectos es previsible que se desplacen los picos de escorrentía tanto superficial como subterránea hacia los primeros meses del año, pudiendo causar escasez de agua en las zonas sin suficiente capacidad de embalse (Barnett *et al.*, 2005). En las regiones dominadas por la nieve, la cubierta de nieve por lo general impide la recarga de aguas subterráneas en invierno, mientras que el deshielo en primavera vuelve a recargar los acuíferos (Kuusisto 1984; Rutulis 1989, Van der Kamp y Maathuis 1991). Debido al contacto directo entre el agua subterránea y la superficie del suelo, los acuíferos, especialmente acuíferos superficiales y poco profundos, son especialmente sensibles a los cambios en las condiciones climáticas (Winter 1999; Healy and Cook 2002; Sophocleus 2002; Dingman 2002; Lee *et al.* 2006). Se prevé que en las regiones dominadas por la nieve, los futuros inviernos más cálidos provoquen cambios en el deshielo y la recarga de las aguas subterráneas (Jyrkama y Sykes 2007; Sutinen *et al.*, 2007). Además, la escorrentía superficial debida a la fusión de la nieve puede ocurrir durante largos periodos y adelantarse a principios de año (Veijalainen 2008). Estos cambios muy probablemente modifiquen el régimen de recarga y descarga, y por lo tanto afecten a la hidrodinámica de las aguas subterráneas y a la interacción de éstas con las aguas superficiales.

En líneas generales, el agua subterránea contenida en un sistema aluvial (en fuerte interacción con los cursos de agua superficiales) o en un sistema carbonatado de tipo kárstico (donde las escorrentías a través de los conductos kársticos pueden ser muy rápidas) responderá más rápidamente al forzamiento climático que el agua contenida en acuíferos sedimentarios (con alternancia de formaciones arenosas más o menos consolidadas) o en rocas cristalinas (granitos y esquistos). La respuesta de las aguas subterráneas al cambio climático puede además reforzarse o, al contrario, moderarse, por el efecto de los usos del suelo y por su grado de explotación por bombeo. Así, por ejemplo, Kim y Jackson (2012) mostraron que la reforestación provoca en general una disminución de la tasa de recarga de los acuíferos, fenómeno que puede incrementar el efecto negativo de un clima más cálido y con menores precipitaciones. Esta complejidad explica que sea generalmente difícil cuantificar con precisión la cantidad de agua contenida en un acuífero, y aún más los cambios que esta puede experimentar en el futuro. Resulta difícil hacer una evaluación fiable de la

evolución del contenido de agua en los acuíferos pirenaicos en las últimas décadas. Esto se debe a la existencia de una red piezométrica insuficiente, y a que por lo general se reduce a series de datos con una longitud inferior a quince años. El informe Aclimatterra (Le Treut *et al.*, 2013) subraya la falta de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en los recursos hídricos subterráneos en la cuenca Adour-Garona.

De forma similar, y en lo referente a los sistemas hidrogeológicos de la parte central de los Pirineos franceses, se ha indicado que no es posible confirmar una tendencia ni positiva ni negativa (AEAG, 2011). Por este motivo, la mayoría de los estudios existentes se centran en caracterizar el impacto de los cambios del clima sobre la recarga, utilizando modelos de simulación. Una eventual disminución de la pluviometría en cantidad y estacionalidad, y la modificación del reparto de esta entre precipitación sólida y líquida, tienen potencialmente una fuerte influencia sobre la recarga de los acuíferos. Asimismo, el incremento de la evapotranspiración a causa del cambio climático (incremento de la demanda atmosférica de humedad) o de los cambios en los usos del suelo (revegetación), tienen un fuerte impacto sobre el balance hidrológico y por tanto sobre la recarga de los acuíferos. Esto es especialmente cierto para los acuíferos libres, que se ven especialmente influenciados por los cambios en el balance hidrológico. Conviene además destacar que las proyecciones podrían verse afectadas, también, por cambios futuros en la intensidad de las precipitaciones, cuyo impacto sobre la recarga de los acuíferos está todavía poco estudiado.

En Francia, el proyecto RExHyss (Habets *et al.*, 2013) estimó en un 30% la disminución de la recarga anual de los sistemas hidrogeológicos de las cuencas del Sena y del Somme. Esta disminución se debe en gran medida a la disminución proyectada de la precipitación invernal, estimada en una media del 12% para finales del siglo XXI (promedio de un conjunto de modelos climáticos acoplados). En la vertiente francesa de los Pirineos, Caballero *et al.* (2016) estimaron el impacto del cambio de las precipitaciones sobre la recarga de los acuíferos libres para toda la cuenca del Adour-Garona. Utilizaron las proyecciones correspondientes a los escenarios RCP 2.6 y 8.2 sobre un conjunto de cinco modelos climáticos, regionalizados mediante dos métodos distintos y aplicados a dos métodos diferentes de cálculo del balance hídrico, con el objetivo de explorar el rango de incertidumbre de los resultados. Estos mostraron que, para la región pirenaica (departamentos de los Pirineos Atlánticos, Altos Pirineos y Alta Garona y Ariège), la recarga de los acuíferos podría disminuir un promedio del 10% en 2050.

En España, Candela *et al.* (2012) estudiaron las consecuencias del cambio climático sobre la recarga de los acuíferos de la cuenca del río Siurana, afluente del Ebro en Cataluña. Utilizaron para ello el modelo hidrogeológico Visual Balan (Samper *et al.*, 2005), forzado con un conjunto de salidas de modelos acoplados y bajo los escenarios SRES A2 y B1. Estimaron así una disminución de la recarga de entre el 5 y el 15% para el año 2050. Señalaron también que esta tendencia podría ser incluso mayor si a los efectos del cambio climático se añadían los efectos de la posible evolución futura de los usos del suelo, ligada a una disminución de las superficies cultivadas, un aumento de la cubierta forestal y una expansión del cultivo de la vid. Ortuño *et al.* (2009), empleando el mismo modelo hidrogeológico y escenarios, analizaron diversas cuencas de Cataluña, y resaltaron la dificultad de cuantificar los impactos futuros sobre la recarga de acuíferos, destacando la variabilidad existente entre distintos acuíferos y diferentes escenarios climáticos. Pese a todo, evaluaron una disminución media de la recarga en torno al 25% para el periodo 2017- 2100, para el escenario climático A2, y del 19% para el escenario B2.

Un estudio técnico de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE, 2005) estimó, para los horizontes de 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100, reducciones medias del 12%, 21% y 19% para el caudal total; b) 17%, 25% y 19% para la escorrentía superficial; c) 9%, 18% y 18% para el flujo hipodérmico; y d) 13%, 23% y 20% para el flujo subterráneo. Estos resultados se basaron en la aplicación del modelo hidrológico distribuido GIS-BALAN, forzado con datos climáticos de las proyecciones del modelo de circulación general CGCM3 y los escenarios A1B, A2, B1 del IPCC [SB2] y al escenario COMMIT del Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis. La parametrización de GIS-BALAN se realizó utilizando series de datos de caudal y niveles piezométricos en las estaciones de aforo y piezómetros de la Confederación Hidrográfica del Ebro durante el periodo comprendido entre 1970 y 2000.

Finalmente, los cambios en los sistemas hidrogeológicos pueden también tener su reflejo en las numerosas surgencias y manantiales que existen en ambas vertientes de los Pirineos, tanto en sistemas kársticos, cristalinos, sedimentarios como incluso aluviales. Los caudales de los manantiales, así como su evolución estacional, dependen en gran medida del funcionamiento del acuífero que los sustenta, por lo que no es sencillo hacer generalizaciones. Es muy probable que sean las surgencias asociadas a acuíferos libres las que se vean afectadas en mayor medida por los cambios en el balance hidrológico de sus zonas de recarga. Las surgencias que presentan mayor vulnerabilidad al cambio climático son aquellas

que se caracterizan por presentar un funcionamiento estacional, con importantes fluctuaciones entre los periodos de aguas altas y bajas. Observaciones realizadas en surgencias de los Pirineos muestran que estas pueden presentar episodios de agotamiento durante años especialmente secos. Estos episodios podrían hacerse más frecuentes en el futuro en este tipo de sistemas, que tienen una baja función capacitiva y tiempos de residencia breves.

2.6.4 Cambios en las aguas subterráneas y en las surgencias

La calidad de las aguas, entendida como la concentración de diferentes compuestos naturalmente presentes o artificiales –p.ej. contaminantes-, dependen de las diferentes fuentes de contaminación pero también del caudal circulante. Los contaminantes pueden provenir tanto de fuentes difusas (p.ej. la escorrentía de residuos agrícolas o ganaderos) como de puntuales (vertidos de aguas pobremente tratadas). Pero el caudal es el principal impulsor del cambio en los parámetros metabólicos de la comunidad biológica y de los parámetros fisicoquímicos del agua, especialmente a pequeñas escalas temporales y espaciales como las que se dan en ríos de montaña (Hunt *et al.*, 2012; Marcarelli *et al.*, 2010). Precisamente a estas pequeñas escalas, la presencia de contaminantes tiene un papel determinante en la calidad del agua. Como se ha visto en apartados anteriores, el cambio climático y los cambios en los usos del suelo (revegetación) han afectado y se prevé afecten en futuro a los caudales circulantes, lo que tendrá consecuencias en la calidad del agua. Por un lado las sequías y los periodos de estiaje más largos tienen un efecto directo al reducir el factor de dilución de los contaminantes que llegan a los ríos, dando lugar a un aumento en la concentración de contaminantes y por lo tanto a un empeoramiento de la calidad del agua.

Por otro lado, las inundaciones, aunque inicialmente puedan promover la dilución de estos contaminantes, promueven el arrastre desde las cuencas fuertemente humanizadas (fuentes difusas) y la re-mobilización de contaminantes retenidos en los sedimentos (Petrovic *et al.* 2011). El resto de factores que influyen en la dinámica del flujo de sustancias contaminantes se derivan de las actividades humanas (embalses, azudes, mini centrales, extracciones de agua, etcétera), todas ellas muy presentes en los ríos pirenaicos. Además, los eventos extremos relacionados con el cambio climático tienen un impacto en los mecanismos de transferencia térmica entre el aire y el agua (Val *et al.*, 2017). Este desacoplamiento puede conducir a cambios en los procesos químicos y biológicos implicados en la calidad del agua.

La reducción de los caudales circulantes suele comportar un empeoramiento de la calidad química del agua, al incrementar la concentración de los contaminantes derivados de las actividades humanas en las cuencas (Petrovic *et al.* 2011). La combinación de bajos caudales y la presencia de sustancias tóxicas que afectan a las comunidades biológicas acuáticas acaba provocando problemas estructurales y funcionales en los ecosistemas fluviales (Val *et al.* 2016a, 2016b). Esta estrecha relación entre calidad (química y ecológica) y el caudal ha sido plenamente reconocida e integrada en la Directiva Marco del Agua Europea (DMA). Por ejemplo, en las recomendaciones para el monitoreo de las masas de agua se acentúa de manera explícita la importancia del “seguimiento del volumen y el nivel de flujo en la medida en que sea pertinente para el estado ecológico y químico” (DMA, art. 8).

La falta de caudales en determinados tramos puede ser especialmente grave cuando éstos reciben los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales (EDAR). En estos casos (como sucede, por ejemplo, en el río Llobregat) los efluentes pueden llegar a suponer casi el 100% del caudal circulante (Huerta *et al.* 2008). La falta de una adecuada depuración en estos casos, provoca serias alteraciones en la calidad aguas abajo. Otro factor de riesgo, es justamente, la contraria: la ausencia de EDAR en muchos núcleos de población de los Pirineos. Un inadecuado dimensionamiento de las plantas y de la elección de las tecnologías, sumado a la crisis económica, ha bloqueado en la última década la construcción de muchas EDAR, lo que ha provocado que muchos municipios pirenaicos estén vertiendo sus aguas residuales sin tratamiento.

Es de esperar que el descenso de los caudales en zonas de cabecera de los Pirineos, combinada con una mayor frecuencia de eventos extremos (riadas y sequías), reduzca el factor de dilución de los contaminantes presentes en las cuencas, desembocando en un empeoramiento de la calidad físico-química de las aguas (Petrovic *et al.* 2011). Tampoco hay que desdeñar el potencial incremento de la temperatura del agua resultado del incremento en la temperatura media del aire (Pérez-Zanon *et al.*, 2017). Recientemente se ha descrito en ríos Pirenaicos que los eventos extremos relacionados con el cambio climático impacta en los mecanismos de transferencia térmica entre el aire y el agua (Val *et al.*, 2017). Este desacoplamiento puede conducir a cambios en los procesos químicos y biológicos mediados por la temperatura, que acabarían teniendo implicaciones en la calidad del agua.

De hecho, algunas evidencias de este empeoramiento son ya observables. Recientes estudios de series históricas del río Gállego en Jabarrella (Huesca)

muestran un fuerte impacto sobre el metabolismo de la comunidad biológica asociado a una caída en los caudales, que sería explicable por una mayor concentración de los contaminantes presentes en esa zona del río (Val *et al.*, 2016b). En esa misma zona se han realizado estudios sobre el impacto de la toxicidad del mercurio en escenarios futuros de aumento de las temperaturas. Los resultados mostraron que ese incremento de temperatura repercute en la sensibilidad de la comunidad biológica (algas) a la presencia de mercurio en el agua. El mismo estudio muestra también que otros factores como la presencia de material particulado o disuelto proveniente de la cuenca y cuyas dinámicas se verán también alteradas en los próximos años, alterarían no solo la composición del agua del río sino que también modularían (en ambos sentidos) la toxicidad de los contaminantes presentes en el agua (Val *et al.*, 2015c). Por ejemplo, mientras que un aumento en los sólidos en suspensión debido a las riadas reduciría la toxicidad de los metales pesados, los cambios en la calidad del material disuelto, como carbono orgánico, podría aumentarla.

Estas predicciones se ven reforzadas por estudios previos basados en índices de diatomeas (Gomà *et al.*, 2005). Estos índices otorgan mejores puntuaciones a la presencia de especies poco tolerantes a la polución; así, valores elevados indican un mejor estado químico de las aguas. En un estudio del año 1998 se observaba ya que para los ríos de los Pirineos orientales el periodo con mejor calidad del agua era el de mayores caudales debido a la fusión de la nieve mientras que los peores valores se obtenían en septiembre, durante el periodo de bajos caudales (Gomà *et al.*, 2005).

2.6.5 Cambios en la composición biológica de las masas de agua

El cambio climático global, la transformación de los usos del suelo y la polución actúan como factores de estrés en los ecosistemas acuáticos de montaña, amenazando su funcionamiento y su grado de salud. La existencia de fuertes gradientes en los factores abióticos en las zonas de montaña crean una gran variedad de micro-hábitats que soportan una rica biodiversidad. Los organismos que pueblan estos hábitats están con frecuencia adaptados a un rango muy limitado de condiciones abióticas, lo que los hace especialmente vulnerables al cambio climático (Elsen y Tingley, 2015; Nogués-Bravo *et al.*, 2007). Algunas especies pueden utilizarse a modo de indicadores de degradación ambiental. Su presencia o ausencia y su mejor o peor estado fisiológico puede informar acerca del estado de salud de todo el ecosistema acuático. Los anfibios, como organismos semi-acuáticos, están afectados por las condiciones cambiantes de su

hábitat tanto en el agua como fuera de ella. Debido a su sensibilidad, se utilizan con frecuencia como indicadores de la calidad de los sistemas acuáticos. La extinción acelerada de especies de anfibios a escala global se considera que está relacionada con una combinación compleja de interacciones entre la pérdida de hábitats y la degradación ambiental, además de verse reforzada por la emergencia y desarrollo de plagas y enfermedades (Blaustein y Kiesecker, 2002). El desarrollo alarmante de un hongo patógeno, *Batrachochytrium dendrobatidis* (Bd.), se considera como uno de los principales responsables del declinar reciente de muchas especies de anfibios (Wake y Vredenburg, 2008). Las epidemias de Bd. se han confirmado en varios ambientes bioclimáticos contrastados, y las áreas de montaña están afectadas de forma especial. Bd. se dispersa a través de zoosporas acuáticas, infectando la piel de los anfibios. La infección puede conllevar el desarrollo por parte del organismo portador, llegando a causar su muerte. Bd. está presente también en los Pirineos, y ha llegado a provocar la extinción de poblaciones de anfibios. La intensidad observada de infecciones de anfibios por Bd. varía espacialmente (Figura 2.6.6), con una elevada concentración en la zona central-occidental, en las proximidades del Parc National des Pyrénées (Francia).

Tanto para mejorar la conservación de las especies de anfibios como para monitorizar la salud de los ecosistemas acuáticos, es importante conocer las condiciones ambientales que regulan la expansión del patógeno. La temperatura del agua es uno de los factores más importantes que determinan el crecimiento y expansión de Bd. Estudios de cultivo han mostrado que Bd. tiene un desarrollo óptimo entre 17 y 25°C, y las zoosporas no toleran la desecación. La existencia de temperaturas por encima de este rango representa una limitación para el patógeno. Las bajas temperaturas, por otro lado, se han relacionado con el desencadenamiento de brotes de enfermedad. Esto puede explicarse por un cambio en la estrategia de Bd., que produce un mayor número de zoosporas en ambientes fríos (Woodhams et al. 2008). Los ambientes húmedos, por otro lado, favorecen el crecimiento de los hongos, y se ha relacionado un incremento de las tasas de infección con la prevalencia de condiciones húmedas (Berger et al., 2004; Murray et al., 2011). Las especies de anfibios que habitan humedales estacionales, en cambio, se han mostrado afectadas en menor medida por la enfermedad (Scheele et al., 2015). Los cambios en las condiciones hidro-climáticas se superponen a las condiciones impuestas por la transformación de los usos del suelo y de la cubierta

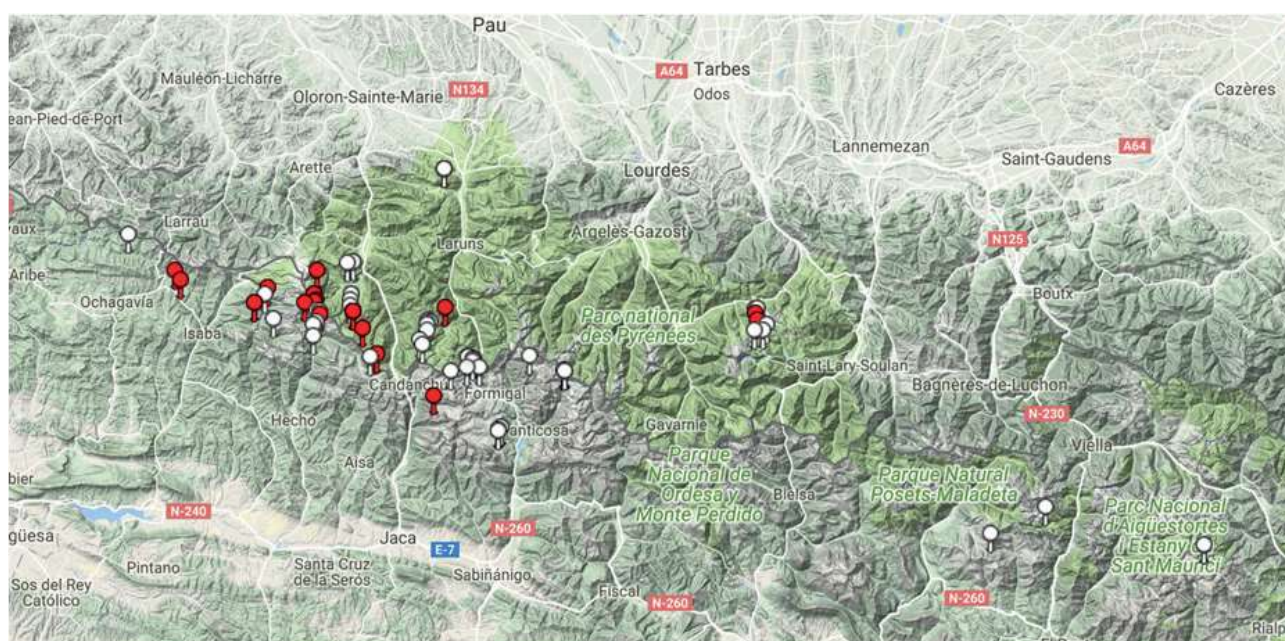


Figure 2.6.5. Prevalencia del hongo *Batrachochytrium dendrobatidis* en los Pirineos: localizaciones con presencia (marcador rojo) y ausencia (marcador blanco). (Fuente: www.bd-maps.net)

vegetal. Es probable que este tipo de alteraciones no climáticas condicionen en gran medida los patrones de expansión de *Bd.* en los Pirineos. Para confirmar esta hipótesis, es necesario recopilar y analizar datos sobre la climatología, cantidad y calidad del agua, incluyendo las características físico-químicas de las masas de agua. El proyecto SUDOE V - P3 (*People, Pollution and Pathogens*) tiene como objetivo investigar la salud de los ecosistemas acuáticos de los Pirineos y de otros tres sistemas montañosos en Estados Unidos, China y Omán. En el seno de este proyecto, se toman y analizan muestras de calidad de agua, sedimento y micro-bioma a lo largo de gradientes de altitud en los distintos macizos. La modelización hidrológica (a partir del modelo *Soil and water assessment tool*, SWAT) se utiliza también en el proyecto, con la finalidad de caracterizar el ciclo hidrológico en las cuencas de montaña y la dinámica de las características físicas y químicas de las masas de agua. Esta información, combinada, permitirá evaluar de qué manera responderá la distribución del patógeno *Bd.* al cambio climático en los Pirineos, y sus posibles impactos sobre la salud de los ecosistemas acuáticos.

Como consecuencia del cambio climático, se ha constatado una redistribución generalizada de diferentes especies de aguas continentales hacia altitudes más elevadas (Hari *et al.*, 2006). A medida que los ríos y arroyos se vuelven más cálidos, los peces de aguas cálidas desplazan a los peces de aguas más frías de su hábitat (Matthew, 2016). En ríos de zonas montañosas de EEUU se ha descrito, por ejemplo, el adelanto en las fechas de migración de poblaciones de salmónidos como respuesta a las temperaturas más cálidas del agua (Kovach, 2012).

En los lagos de montaña, las características físicas del ambiente están muy influidas por los efectos del cambio climático (Thompson *et al.*, 2009). Por ejemplo, si el período de hielo es más breve se incrementa la productividad del lago al aumentar la duración del período durante el cual es posible la fotosíntesis, además de que una mayor temperatura del agua posiblemente facilita esta mayor productividad (Mendoza, 2013).

En una tesis doctoral reciente (Mendoza, 2013), se describe cómo las comunidades de macro-invertebrados de lagos de montaña en los Pirineos responderán al cambio global, con respuestas diferenciadas a sus diferentes componentes: cambio climático, pérdida y fragmentación de hábitat y especies invasoras, los cuales pueden mostrar también efectos de interacción mutua. El desplazamiento de las especies hacia aguas arriba implica una reducción de la disponibilidad de hábitat, lo que posiblemente acarreará extinciones locales (Mendoza, 2013).

2.6.6 Conclusiones y recomendaciones para la adaptación

El término *Gestión Integrada de los Recursos Hídricos* (GIRH) denota “un desarrollo y gestión coordinados de los recursos hídricos, la tierra y demás recursos naturales, con el fin de maximizar el bienestar económico y social” (Agarwall *et al.*, 2000). A pesar del relativo éxito de este concepto entre la comunidad científica, existen pocos ejemplos de su aplicación práctica a la gestión de los recursos hídricos. Sin embargo, es evidente que para abordar los retos del cambio climático con relación al recurso agua hay que adoptar una visión integradora de la gestión del territorio, que replantee la distribución territorial del uso del agua. Las áreas de cabecera generan la mayor parte de los recursos hídricos que se usan aguas abajo en las planicies y las regiones costeras con déficit de agua y alta densidad de población. Por lo tanto, las acciones sobre los usos del agua de la cabecera pueden representar una opción de adaptación efectiva en ambientes con escasez de agua. Por ejemplo, distintas opciones de manejo forestal como el aclareo pueden mejorar la infiltración de aguas subterráneas y la escorrentía superficial, aumentando así la producción de agua azul³⁶ a la escala de cuenca mientras se optimiza la productividad del agua verde³⁷ forestal. Este tipo de acciones, además, tienen un efecto directo y mensurable sobre las sociedades pirenaicas, ya que son generadoras de empleo y actividad económica.

La gestión del agua en el territorio pirenaico se enfrenta también a retos de conocimiento. A pesar de que sobre

(36) Agua azul es el agua dulce superficial (en los ríos, lagos y embalses) más el agua subterránea (en los acuíferos), constituyendo la parte de los recursos hídricos susceptible de soportar un uso consuntivo.

(37) Agua verde es el agua almacenada in situ en el lugar donde se produce la precipitación, fundamentalmente en el suelo, y que es evaporada directamente a la atmósfera o bien utilizada por las plantas (ya sea vegetación natural o cultivos) en el proceso conocido como transpiración para satisfacer sus necesidades fisiológicas de mantenimiento o crecimiento. El agua verde es también, por tanto, una parte de los recursos hídricos de un territorio.