
*Adaptación al cambio
climático en la gestión
de los recursos hídricos
de los Pirineos*

Memorias del proyecto PIRAGUA · Volumen II

Beguería S. (ed.), 2023. Adaptación al cambio climático en la gestión de los recursos hídricos de los Pirineos. Memorias científicas del proyecto PIRAGUA, vol. 2. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Zaragoza, España (220pp.).

DOI: <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14684>

Coordinación y edición: Santiago Beguería (EEAD-CSIC)

Autores (por orden alfabético): Iñaki Antigüedad (UPV/EHU), Santiago Beguería (EEAD-CSIC), Roxelane Cakir (CNRS), Marta Domènech (AR+I), David Haro-Monteaigudo (EEAD-CSIC), Peng Huang (INRAE), Jorge Jódar Bermúdez (IGME-CSIC), Luis Javier Lambán Jiménez Philippe Le Coent (BRGM), (IGME-CSIC), Gaël Le Roux (CNRS), María del Carmen Llasat (UB), Montserrat Llasat-Botija (UB), Maite Meaurio (UPV/EHU), Leticia Palazón (EEAD-CSIC), Erika Pardo (UB), Marc Pons (AR+I), Fabienne Sans, Eric Sauquet (INRAE), Oriol Travesset (AR+I), Jesus Uriarte (UPV/EHU), María Valiente (UPV/EHU), Jean-Philippe Vidal (INRAE), Ane Zabaleta (UPV/EHU)

Traducción: Maramara y S. Beguería

Edición gráfica y maquetación: Samuel Barrena

Fotografía de portada: Les Argonautes

Notas legales

Las noticias y opiniones contenidas en esta obra son de la exclusiva responsabilidad de los autores, y no reflejan necesariamente las opiniones oficiales de las instituciones a las que éstos pertenecen o del organismo financiador del proyecto. Ni los autores, ni las instituciones a las que pertenecen, ni el organismo financiador son responsables del uso que se pueda hacer de las informaciones contenidas en esta obra.

Derechos de autor

Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Esta licencia permite copiar y redistribuir la obra o partes de la misma en cualquier medio o formato y remezclar, transformar y construir a partir de sus contenidos, bajo los siguientes términos: atribución —dar crédito de manera adecuada utilizando las referencias que se indican, ofreciendo un enlace a la licencia, e indicando si se han realizado cambios sobre la obra original; uso no comercial —no se puede hacer uso de la obra con propósitos comerciales.

Prólogo

El cambio climático reciente es una de las principales amenazas para la sostenibilidad de las sociedades humanas y para la salud ecológica de nuestro planeta. Las actividades humanas, y en especial el incremento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, han desencadenado una alteración del balance energético global cuyo efecto más notable ha sido el incremento de la temperatura del planeta a un ritmo de 0.1 °C por década a lo largo de los últimos cien años (IPCC, 2014). Las consecuencias de este calentamiento incluyen la retirada de glaciares en los casquetes polares y las montañas, la subida del nivel del mar, una mayor incidencia de olas de calor, y muy posiblemente también alteraciones del sistema hidrológico, además de cambios en los sistemas biológicos.

Los informes del IPCC, el Acuerdo de París o las Conferencias de las Naciones Unidas sobre cambio climático atestiguan el interés político global por emprender con urgencia acciones para la mitigación del cambio climático. A pesar de las dificultades políticas durante las fases de negociación y de implementación, estas reuniones y acuerdos son testimonio del firme propósito de una parte importante de las sociedades humanas en realizar una transición hacia una economía global sin emisiones de carbono que permita ralentizar o limitar el proceso de calentamiento global.

Los esfuerzos en mitigación, sin embargo, no son suficientes para minimizar las consecuencias negativas del cambio climático. Es necesario, en paralelo a las medidas de mitigación, desarrollar estrategias de adaptación al cambio climático que permitan minimizar los riesgos que supone este para las sociedades. Con un enfoque mucho más local, el desarrollo de estrategias de adaptación debe partir de una evaluación de la vulnerabilidad del conjunto de la sociedad o de sectores de ésta a las consecuencias esperables del cambio climático. En esta fase, la investigación tiene un papel fundamental debido a su capacidad para proporcionar análisis y modelos de vulnerabilidad fiables y con información del grado de incertidumbre, es decir para generar información fiable sobre la que sentar las bases que permitan desarrollar procesos de toma de decisiones implicando a todos los sectores de la sociedad.

La realización y difusión de esta guía de síntesis de opciones de adaptación se enmarca dentro de este objetivo más general de desarrollar un diálogo entre ciencia y sociedad, que entendemos indispensable para impulsar una acción eficaz y compartida para la adaptación al cambio climático en los Pirineos. El cambio climático reciente es una de las principales amenazas para la sostenibilidad de las sociedades humanas y para la salud ecológica de nuestro planeta. Las actividades humanas, y en especial el incremento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, han desencadenado una alteración del balance energético global cuyo efecto más notable ha sido el incremento de la temperatura del planeta a un ritmo de 0.1 °C por década a lo largo de los últimos cien años

(IPCC, 2014). Las consecuencias de este calentamiento incluyen la retirada de glaciares en los casquetes polares y las montañas, la subida del nivel del mar, una mayor incidencia de olas de calor, y muy posiblemente también alteraciones del sistema hidrológico, además de cambios en los sistemas biológicos.

Los informes del IPCC, el Acuerdo de París o las Conferencias de las Naciones Unidas sobre cambio climático atestiguan el interés político global por emprender con urgencia acciones para la mitigación del cambio climático. A pesar de las dificultades políticas durante las fases de negociación y de implementación, estas reuniones y acuerdos son testimonio del firme propósito de una parte importante de las sociedades humanas en realizar una transición hacia una economía global sin emisiones de carbono que permita ralentizar o limitar el proceso de calentamiento global.

Los esfuerzos en mitigación, sin embargo, no son suficientes para minimizar las consecuencias negativas del cambio climático. Es necesario, en paralelo a las medidas de mitigación, desarrollar estrategias de adaptación al cambio climático que permitan minimizar los riesgos que supone este para las sociedades. Con un enfoque mucho más local, el desarrollo de estrategias de adaptación debe partir de una evaluación de la vulnerabilidad del conjunto de la sociedad o de sectores de ésta a las consecuencias esperables del cambio climático. En esta fase, la investigación tiene un papel fundamental debido a su capacidad para proporcionar análisis y modelos de vulnerabilidad fiables y con información del grado de incertidumbre, es decir para generar información fiable sobre la que sentar las bases que permitan desarrollar procesos de toma de decisiones implicando a todos los sectores de la sociedad.

La realización y difusión de esta guía de síntesis de opciones de adaptación se enmarca dentro de este objetivo más general de desarrollar un diálogo entre ciencia y sociedad, que entendemos indispensable para impulsar una acción eficaz y compartida para la adaptación al cambio climático en los Pirineos.

Tabla de contenidos

1. Retos y oportunidades para la adaptación al cambio climático en la gestión de los recursos hídricos de los Pirineos

1.1. Relevancia regional de los recursos hídricos de los Pirineos, evolución reciente y perspectivas futuras	2
1.2 Los casos de estudio del proyecto de cooperación transfronteriza PIRAGUA	5
1.2.1 <i>La competencia por los recursos hídricos en Andorra</i>	7
1.2.2 <i>Impactos del cambio climático en la gestión de embalses de producción hidroeléctrica: el caso de los valles de Nestes d'Aure y Louron</i>	7
1.2.3 <i>Adaptación al cambio climático en la agricultura de regadío: el caso de Riegos del Alto Aragón</i>	8
1.2.4 <i>Impactos del cambio climático en áreas de especial valor ambiental: presión turística, cambio climático y calidad ambiental en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido</i>	9
1.2.5 <i>Adaptación al cambio climático desde la gestión de la funcionalidad hidrológica del territorio: el caso de la cuenca del río Bidasoa</i>	9
1.2.6 <i>Transformación del territorio y dinámica hidrológica en zonas de cabecera: el caso de la turbera de Bernadouze (Ariège).</i>	10
1.2.7 <i>Impactos de las inundaciones y eventos extremos en los recursos hídricos de los Pirineos en un contexto de cambio climático.</i>	10
1.3.1 <i>Importancia de los modelos de vulnerabilidad al cambio climático</i>	12
1.3 Principios transversales de la adaptación al cambio climático	12
1.3.2 <i>Importancia de conocer los servicios ecosistémicos y promover soluciones basadas en la naturaleza</i>	13
1.3.3 <i>Importancia de considerar a todos los actores</i>	14

2. Gobernanza de los recursos hídricos de los Pirineos y estrategias de adaptación

2.1. Gobernanza de los recursos hídricos de los Pirineos	18
2.1.1 <i>Contexto institucional e histórico</i>	18
2.1.2 <i>Planes de gestión de cuenca y adaptación al cambio climático</i>	20
2.2.1 <i>Contexto internacional y europeo</i>	23
2.2. Estrategias de adaptación al cambio climático con relación a los recursos hídricos	23
2.2.2 <i>Planes nacionales de adaptación al cambio climático</i>	24
2.2.3 <i>Estrategias regionales y transfronterizas para la adaptación al cambio climático en los Pirineos</i>	27
2.3. Conclusiones	32

3. La competencia por los recursos hídricos en la actualidad y su evolución futura: el caso del Principado de Andorra

3.1. Introducción	36
3.2. Retos del cambio climático y el cambio global con respecto a la competencia por los usos del agua, y opciones de adaptación	39

3.3. El ejemplo del Principado de Andorra	41
3.3.1 Efectos del cambio climático y el cambio global en el régimen hídrico	45
3.3.2 Afectaciones del cambio climático y el cambio global a las funciones ecosistémicas	46
3.3.3 Afectaciones del cambio climático y el cambio global al sector hidroeléctrico	47
3.3.4 Afectaciones del cambio climático y el cambio global en un tramo de río con alta competencia por el agua	49
3.3.5 Capacidad de adaptación	51
3.4.1 Población residente y turismo	54
3.4. Conclusiones	54
3.4.2 Agricultura	55
3.4.3 Producción de energía hidroeléctrica	55
3.4.4 Funciones ecosistémicas	56

4. Impacto del cambio climático en la gestión de los embalses de producción hidroeléctrica: el caso de los valles del Neste d'Aure y del Neste de Louron

4.1. Introducción	60
4.2. El impacto del cambio climático en la producción de energía hidroeléctrica y la gestión de los embalses	62
4.3.1 Adaptación al cambio climático en la gestión de los embalses	63
4.3. Estrategias de adaptación	63
4.3.2 Adaptación al cambio climático en la cuenca Adur-Garona	65
4.4.1 Contexto	67
4.4. Lecciones de un estudio de caso: la gestión en los valles del Neste d'Aure y del Neste de Louron	67
4.4.2 Efectos del cambio climático	69
4.4.3 Estrategias de adaptación	71
4.5. Conclusiones	75

5. Adaptación al cambio climático en la agricultura de regadío: el caso de Riegos del Alto Aragón

5.1. Introducción	78
5.2. Retos del cambio climático para la agricultura de regadío y estrategias de adaptación	82
5.3.1 Contexto general	85
5.3. El caso de estudio del sistema Riegos del Alto Aragón	85
5.3.2 Análisis de los recursos hídricos disponibles (presente y futuro)	88

5.3.3 Modelización de los recursos hídricos bajo escenarios de cambio climático y medidas de adaptación	91
5.3.4 Resultados	93
5.4.1 Escasa eficacia de las soluciones centradas en el aumento de la oferta de agua (regulación)	98
5.4 Discusión y conclusiones	98
5.4.2 Necesidad de promover soluciones centradas en el control de la demanda de agua y el aumento de la productividad	99
5.4.3 Insuficiencia de los enfoques de una vía (de arriba-abajo o de abajo-arriba) y valor de los sistemas de apoyo a la toma de decisiones	99
5.4.4 Otros factores: aterramiento de los embalses, usos del suelo, usuarios aguas abajo y caudales ecológicos	100

6. Impactos del cambio climático en áreas de alto valor ambiental: presión turística, cambio climático y calidad ambiental en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido

6.1. Introducción	104
6.2.1 Retos del cambio climático en áreas de alto valor ambiental	106
6.2. Retos del cambio climático y el cambio global en áreas de especial valor ambiental y estrategias de adaptación	106
6.2.2 Estrategias de adaptación	107
6.3.1 Introducción	109
6.3. El caso de estudio del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido (Huesca)	109
6.3.2 Área de estudio	110
6.3.3 Evaluación de los efectos del cambio climático en la cantidad de los recursos hídricos	111
6.3.4 Evaluación de los efectos del cambio climático y el turismo en la calidad de los recursos hídricos disponibles.	117
6.4. Conclusión	119

7. Adaptación al cambio climático desde la gestión de la funcionalidad hidrológica del territorio: el caso de la cuenca del río Bidasoa

7.1. Introducción	124
7.2.1 Retos del cambio climático sobre la planificación hidrológica y del territorio	128
7.2 Retos de la gestión del territorio ante el cambio climático y el cambio global	128
7.2.1 La Evapotranspiración (ET)	129
7.2.2 Estrategias de adaptación	135
7.3 El caso de estudio de la cuenca del Bidasoa (Navarra)	138
7.3.1 Factores sociales y económicos	139
7.3.2 Sistemas de abastecimiento	139
7.3.3 Planificación territorial, desde 1956 hasta 2019	141
7.3.4 Definición de Espacios de Prioridad Hidrológica (EPH) en la cuenca del Bidasoa	144

7.3.5 Percepción social sobre los servicios hidrológicos del territorio	146
7.3.6 Propuesta de acciones de adaptación	147
7.4 Conclusiones	148

8. Transformación del territorio y dinámica hidrológica en cabecera: el caso de la turbera de Bernadouze en el Ariège

8.1 Introducción	154
8.2.1 Simulación del funcionamiento hidrológico de la cuenca de Bernadouze	156
8.2 Caso de estudio	156
8.2.2 Impactos del cambio climático en la hidrología	159
8.2.3 Estrategias de adaptación: impacto de la tala forestal sobre los cambios del paisaje	160
8.3 Conclusiones	165

9. Impactos de las inundaciones y eventos extremos en los recursos hídricos de los Pirineos en un contexto de cambio climático

9.1 Introducción	170
9.2 Retos del cambio climático en relación con el riesgo de eventos hidrológicos extremos	172
9.3 Coordinación de las estrategias de adaptación frente a las inundaciones en los Pirineos	174
9.4.1 La base de datos PIRAGUA_flood	181
9.4 Dos experiencias piloto para la mejora del conocimiento y la participación ciudadana en la adaptación al riesgo de inundación en los Pirineos	181
9.4.2 Las inundaciones en los Pirineos en el contexto del cambio climático: FLOODUP, un proyecto educativo y de ciencia ciudadana	185
9.5.1 Introducción a los episodios de sequía de 1986-1989 y 2004-2008	191
9.5 Análisis del desarrollo y aplicación de medidas de adaptación frente a sequías en Cataluña	191
9.5.2 El episodio de sequía de 1986-1989	192
9.5.3 El episodio de sequía de 2004-2008	193
9.5.4 Descripciones de las medidas de adaptación desarrolladas entre ambos eventos	195
9.6 Conclusiones y recomendaciones	198

Bibliografía

Índice de Figuras

<i>Figura 1.1. Localización de los siete casos de estudio.</i>	6	<i>Figura 3.8. Demanda de agua mensual en la actualidad y los escenarios Cambio global y Adaptación en el año 2050.</i>	51
<i>Figura 2.1. Delimitación de las administraciones de los recursos hídricos en los Pirineos: Confederación Hidrográfica del Cantábrico (CHC), Agencia Vasca del Agua / Ur Agentzia (URA), Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE), Agencia Catalana del Agua / Agencia Catalana de l'Aigua (ACA), Agence de l'eau Adour-Garonne (AEAG), Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse (AERMC) y el Ministeri de Medi Ambient, Agricultura i Sostenibilitat de Andorra (MMAAS)</i>	20	<i>Figura 3.9. Demanda de agua mensual (hm³) para usos doméstico, turístico, producción de nieve y agricultura en los escenarios considerados para el año 2050.</i>	52
<i>Figura 2.2. Los cinco sistemas que estructuran la Estrategia Pirenaica del Cambio Climático (EPiCC).</i>	29	<i>Figura 3.10. Resultado de la priorización de las estrategias de adaptación al cambio climático propuestas por los encuestados.</i>	56
<i>Figura 3.1. Uso del agua anual promedio por junta de explotación (hm³), uso por sectores (%) y origen del recurso (%).</i>	37	<i>Figura 4.1. Área de gestión de la CACG. Los lagos-embalses de Oule, Orédon, Caillaouas y Pouchergues aparecen como "Embalses de alimentación del sistema Neste (SHEM)".</i>	68
<i>Figura 3.2. Localización de las estaciones esquí y centrales hidroeléctricas de los Pirineos, clasificadas en función del dominio esquiable (km) y la potencia instalada (MW), respectivamente.</i>	38	<i>Figura 4.2. Esquema sinóptico de los valles del Neste d'Aure y del Neste de Louron.</i>	68
<i>Figura 3.3. Demanda mensual de agua en Andorra en los principales sectores de actividad.</i>	42	<i>Figura 4.3. Superficie de respuesta que caracteriza la sensibilidad de las entradas naturales totales a los lagos-embalses a las perturbaciones climáticas. Las curvas representan posibles trayectorias desde el periodo actual hasta el final del siglo, muestreadas cada 10 años con los escenarios RCP4.5 (azul) y RCP8.5 (verde). Cada punto es representativo de un periodo consecutivo de 20 años (media de 6 proyecciones climáticas). Las zonas en azul y verde representan la dispersión de las proyecciones del clima del proyecto CLIMPY. Los límites de las zonas críticas para los usos en relación con el cambio climático se identifican con líneas en negro.</i>	70
<i>Figura 3.4. Cambio en el régimen mensual de caudal en la salida de la cuenca de Andorra (Borda Sabaté) en el año 2050 en el escenario Actual y en los escenarios Referencia, Cambio climático y Cambio global.</i>	45	<i>Figura 4.4. Evolución del régimen hidrológico de las entradas a los lagos-embalses de Caillaouas y Pouchergues en diferentes horizontes (las simulaciones obtenidas con el reanálisis SAFRAN-PIRAGUA son la referencia histórica actual, las simulaciones con cambio climático se obtienen con seis proyecciones desarrolladas por el proyecto CLIMPY).</i>	71
<i>Figura 3.5. Energía eléctrica producida en la central hidroeléctrica de Encamp en los escenarios Actual, Referencia y Cambio global en el año 2050.</i>	48	<i>Figura 4.5: Esquema conceptual de las trayectorias de adaptación.</i>	72
<i>Figura 3.6. Localización del tramo de río con alta competencia por el agua, entre Ransol y Escaldes-Engordany.</i>	49	<i>Figura 4.6. Marco genérico de modelización.</i>	73
<i>Figura 3.7. Caudal mensual en el año 2050 del tramo de río con alta competencia por el agua, entre Ransol i Escaldes-Engordany (coordenadas Lambert III Sud-Andorra 536028;24948) y en los diferentes escenarios analizados. En rojo se proyecta el límite de caudal ambiental propuesto por el PSIEA, y en amarillo el caudal mínimo ecológico reglamentario del RPHA.</i>	50	<i>Figura 4.7. Sostenibilidad de las trayectorias de adaptación que combinan diferentes medidas (la combinación G1-M0-DOE-100 corresponde al contexto actual de práctica y gestión).</i>	74

<p>Figura 5.1. La agricultura en los Pirineos (área delimitada por la línea roja) y sus áreas de piedemonte.</p>	79	<p>Figura 6.2. Manantiales de la Cola de Caballo (A), Fuen Blanca (B) y Fuen de Escuaín o Surgencia del Yaga (C).</p>	111
<p>Figura 5.2. Mapa del área de estudio (Sistema de explotación E14 de la Cuenca del Ebro) con la localización de los ríos principales y embalses, información sobre elevación y usos del suelo, delimitación de las zonas de cabecera y valle, y perímetro del sistema Riegos del Alto Aragón.</p>	86	<p>Figura 6.3. Localización del área de estudio, relieve y principales puntos de interés.</p>	112
<p>Figura 5.3. Evolución de la superficie regada (a), volumen de agua suministrado (b), y volumen de agua por unidad de superficie (c) en el sistema Riegos del Alto Aragón.</p>	86	<p>Figura 6.4. Situación, mapa geológico, y cortes geológicos.</p>	113
<p>Figura 5.4. Cambio en los aportes mensuales (a) y anuales (b) a los embalses de Lanuza, La Peña y El Grado (porcentaje con respecto al periodo 1961-2010), para los horizontes 2011-2040, 2041-2070, y 2071-2100. Resultados de la simulación con el modelo SWAT forzado con seis proyecciones climáticas (AEMET, 2018) en dos escenarios de emisiones (RCP 4.5 y RCP 8.5). Las áreas de color en a) indican la envolvente de las seis proyecciones, 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.</p>	90	<p>Figura 6.5. Variación con respecto al periodo de control (1961-2005) de la precipitación, la temperatura, la evapotranspiración, y los caudales de descarga total, de flujo hiporreico y subterráneo, así como de la escorrentía superficial, promediando los valores de cada una de estas variables para los periodos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100.</p>	114
<p>Figura 5.5. Priorización de medidas de adaptación durante la reunión con actores.</p>	93	<p>Figura 6.6. Variación estacional de la descarga total del río Ara, para el periodo de control (1961-2005) como para el periodo 2071-2100 teniendo en cuenta los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 simulados por los diferentes modelos climáticos.</p>	114
<p>Figura 5.6. Indicadores de sostenibilidad para el conjunto del sistema RAA en función de la capacidad de regulación interna, en el presente y en tres horizontes temporales futuros: índice de sostenibilidad global, número de meses con restricciones de riego de acuerdo con el plan de sequía actual, intensidad de las restricciones (% de demanda no cubierta), y caudales ecológicos en los ríos Gállego y Cinca. La capacidad instalada actual se representa mediante una línea gris vertical.</p>	94	<p>Figura 6.7. (A) Sector comprendido entre el macizo del Monte Perdido (3.355 m s.n.m) y la Cola de Caballo (1.800 m s.n.m). Puntos de la Red de control (Fuente de Góriz, Barranco de Góriz, Fuen Roldán, Fuente de las Zetas, y Sifón Silvia) y proyección en superficie de los sistemas kársticos principales (en azul). El sistema Gracias es el sistema de menor elevación. (B) Sistema Garcés en detalle, donde se puede ver la ubicación de las distintas sondas de medida instaladas para monitorizar la respuesta hidrodinámica, química e isotópica del sistema ante las variaciones hidroclimáticas y antrópicas que pueden afectar a la recarga del acuífero.</p>	115
<p>Figura 5.7. Sostenibilidad futura del sistema RAA mediante la optimización del volumen de regulación interna. Los diferentes puntos representan, para cada sector del sistema RAA y escenario climático, el volumen óptimo de reserva interna (paneles de la parte izquierda) que se requiere para mantener o acercarse lo más posible al nivel de sostenibilidad actual del sistema (panel de la derecha). Las líneas horizontales indican el volumen de regulación interna y la sostenibilidad actuales.</p>	95	<p>Figura 6.8. Esquema del modelo conceptual de recarga observado durante el año 2018/19 en el sistema kárstico de Garcés.</p>	115
<p>Figura 5.8. Sostenibilidad futura del sistema RAA mediante la optimización conjunta del volumen de regulación interna y la disminución en la dotación de agua de riego por hectárea. Los diferentes puntos representan, para cada sector del sistema RAA y escenario climático, el volumen óptimo de reserva interna y de ahorro de agua necesarios para mantener o acercarse lo más posible al nivel de sostenibilidad actual del sistema. Las líneas horizontales indican el volumen de regulación interna, ahorro de agua y sostenibilidad actuales.</p>	96	<p>Figura 6.9. Puntos de inyección de trazador en el ensayo de agosto 2019 (1: Sima Marboré; (2) Sima Cigalois; (3) Sima Tartracina; (4) Sima-60), y puntos de descarga asociados a los manantiales Garcés (5) y Fuenblanca (6) La línea A-B marca la trayectoria del perfil geológico mostrado en la Figura 6.12.</p>	116
		<p>Figura 6.10. Corte geológico siguiendo el perfil A-B en la Figura 11. Sobre el corte se muestra la proyección de las simas a través de las cuales se inyectaron los diferentes trazadores. La línea roja, a tramos discontinua, indica la posible trayectoria de los trazadores con el flujo subterráneo a través del sistema kárstico.</p>	117
		<p>Figura 6.11. Puntos de muestreo de agua subterránea en el Sistema Garcés. (A) Campaña de muestreo 29/09/2018. (B) Campaña de muestreo 5/8/2019.</p>	118

<i>Figura 7.1. La cuenca fluvial como sistema integrado de procesos: visión CUENCA, esencial para la gestión adaptativa del territorio, más allá del cauce (modificado de Zabaleta et al., 2021). Se ha señalado en rojo un espacio de prioridad hidrológica (EPH) asociado a una captación.</i>	125	<i>Figura 8.3. Principales elementos de la modelización hidrológica de la turbera de Bernadouze, en el Alto Vicdessos.</i>	155
<i>Figura 7.2. Relación entre valores anuales de precipitación (P), evapotranspiración real (ETR) y caudal (Q) en las cuencas de Avic (derecha) y Gipuzkoa (izquierda).</i>	131	<i>Figura 8.4. Sistema hidroeléctrico de Auzat.</i>	157
<i>Figura 7.3. Enfoque conceptual de desplazamiento asociado a cambios en clima y en usos del suelo.</i>	133	<i>Figura 8.6. Promedio mensual de precipitación (PcP), descarga (Discharge), manto de nieve (SnoPack), deshielo (SnoMelt), rendimiento hídrico (WtrYield), infiltración (Perc) y evapotranspiración (ET) en Artigue, para cada período de tiempo y escenario de emisiones en comparación con el período de referencia 1985-2013. Las envolventes sombreadas indican la variabilidad del conjunto de modelos climáticos utilizados; las líneas azules indican las medianas para el escenario RCP 8.5, las líneas rojas indican las medianas para el escenario RCP 4.5 y las líneas negras representan el período de referencia. La unidad es el milímetro.</i>	161
<i>Figura 7.4. Esquema conceptual para la consideración de los servicios hidrológicos y la delimitación de Espacios de Prioridad Hidrológica en la planificación territorial orientada a su funcionalidad hidrológica.</i>	136	<i>Figura 8.7. Caudal específico estacional medio en Artigue y Vicdessos para diferentes horizontes temporales y escenarios de emisión. Las barras rojas representan el escenario RCP 4.5 y las azules el escenario RCP 8.5. Primavera corresponde a los meses de Abril a Junio, verano de Julio a Septiembre, otoño de Octubre a Diciembre, e invierno de Enero a Marzo.</i>	161
<i>Figura 7.5. Situación geográfica de la zona de estudio, los municipios que la componen, la red hidrográfica y la subdivisión de la cuenca por zonas de abastecimiento (zona de Bidasoa y zona de Baztan).</i>	140	<i>Figura 8.8. Localización de la tala forestal controlada en la cuenca vertiente de la turbera de Bernadouze en el año 2016.</i>	162
<i>Figura 7.6. Geología de la cuenca del Bidasoa y localización y tipo de las captaciones de agua.</i>	142	<i>Figura 8.9. Esquema de las relaciones entre distintas variables hidro-geoquímicas potencialmente afectadas por una tala forestal en el entorno de una turbera. EVT: evapotranspiration; COD: carbono orgánico disuelto.</i>	163
<i>Figura 7.7. Serie de datos en continuo de la evolución de humedad del suelo en el perfil de cada parcela (helechal, prado, robledal y pinar) y datos de precipitación registrados en la estación meteorológica. La humedad se expresa en contenido volumétrico de agua (%) y la precipitación en mm/hora.</i>	143	<i>Figura 8.10. Caudal medio anual (m³ s⁻¹), escorrentía superficial (mm) y aporte de sedimento (Mg ha⁻¹) en Vicdessos para cada período y escenario de emisiones, bajo cuatro escenarios de gestión (ver detalles de los escenarios S0 a S3 en texto principal).</i>	163
<i>Figura 7.8. Espacios naturales protegidos y espacios de protección de la fauna en el Bidasoa.</i>	145	<i>Figura 8.11. Micro-hidrología de las cuencas hidrográficas de montaña: ilustración de las incógnitas que es necesario caracterizar para lograr una mejor gestión concertada de los paisajes y los recursos hídricos.</i>	166
<i>Figura 7.9. Cuencas de drenaje de los manantiales del Bidasoa. Gráficos circulares con la representación del porcentaje de uso del suelo de cada una de ellas. El tamaño del diagrama es indicativo del área de la cuenca de drenaje, cuanto mayor sea ésta, mayor es el diagrama. También se ha representado el relieve (DEM), la red de drenaje y la subdivisión en zonas de abastecimiento (zona de Baztan a la derecha y zona de Bidasoa a la izquierda).</i>	145	<i>Figura 9.1. Mapeo de las medidas de adaptación frente a inundaciones en la región Pirenaica.</i>	178
<i>Figura 7.10. Hoja de ruta para el desarrollo de los Espacios de Prioridad Hidrológica (EPH).</i>	150	<i>Figura 9.2. Número de episodios de inundación con daños extraordinarios y catastróficos que han afectado cada municipio entre 1981 y 2015.</i>	182
<i>Figura 8.1. Localización de la zona de estudio y principales paisajes.</i>	155		
<i>Figura 8.2. Tala forestal en el entorno de la turbera de Bernadouze en</i>			

Figura 9.3. Descripción de la capa de número de crecidas en el Geoportal del Observatorio Pirenaico del Cambio Climático.

183

Figura 9.4. Capa de número de crecidas por municipio coloreado según el número de episodios identificados entre 1981 y 2015.

183

Figura 9.5. Menú emergente mostrando el número de episodios dentro clasificados por su impacto, para el municipio de Bielsa (provincia de Huesca).

184

Figura 9.6. Esquema de los contenidos en la web FLOODUP.

187

Figura 9.7. Flujo de funcionamiento de la app FLOODUP.

189

Figura 9.8. Evolución de las anomalías de la precipitación media anual en el Distrito de Cuenca Fluvial de Cataluña (DCFC) desde el año hidrológico 1940-1941 (de septiembre a octubre) hasta el año hidrológico 2013-2014.

192

Figura 9.9. SPI-12 y SSMI2-1 en octubre de 1989 en España y Portugal (izquierda: reanálisis de SAFRAN; derecha: SURFEX LSM forzado por SAFRAN).

193

Figura 9.10. SPI-12 y SSMI2-1 en junio de 2005 en España y Portugal (izquierda: reanálisis de SAFRAN; derecha: SURFEX LSM forzado por SAFRAN)

194

1. Retos y oportunidades para la adaptación al cambio climático en la gestión de los recursos hídricos de los Pirineos

Santiago Beguería (EEAD-CSIC) y Fabienne Sans (FSVA Eurl)

Los recursos hídricos de los Pirineos tienen una importancia ecológica y socio-económica fundamental, tanto en el seno de la propia cordillera como en sus extensos territorios de piedemonte. En las últimas décadas se han observado cambios en los caudales anuales y en la estacionalidad de los regímenes de los ríos, atribuibles tanto al cambio climático como a un proceso acelerado y generalizado de cambios de los usos del suelo y de la cubierta vegetal de los montes. Las previsiones futuras indican una transición hacia unos Pirineos más secos y pobres en recursos hídricos, sobre todo durante la época estival, con impactos muy diversos e importantes sobre los recursos hídricos. A partir de siete casos de estudio centrados en diferentes temáticas relacionadas con el ciclo hidrológico y los recursos hídricos en distintas zonas de los Pirineos, se ha colaborado con los actores locales para analizar la vulnerabilidad al cambio climático de los territorios y explorar opciones de adaptación. El desarrollo de modelos de vulnerabilidad para explorar los distintos escenarios tanto climáticos como de adaptación, la comunicación de la incertidumbre asociada a dichos escenarios, la implicación de los actores locales y de la ciudadanía, y la búsqueda de soluciones basadas en la naturaleza han sido algunos de los principios transversales que han articulado los distintos casos de estudio.

*Citar como: Beguería, S., y Sans, F. 2023. Retos y oportunidades para la adaptación al cambio climático en los recursos hídricos de los Pirineos. En Beguería (coord.), Adaptación al cambio climático en la gestión de los recursos hídricos de los Pirineos. Memorias científicas del proyecto PIRAGUA, vol. 2. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Zaragoza, España, 1-16.
<https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14684>*

1.1. Relevancia regional de los recursos hídricos de los Pirineos, evolución reciente y perspectivas futuras

La cordillera pirenaica (los Pirineos) es un sistema montañoso localizado al norte de la Península Ibérica entre los países de España, Francia y Andorra. Con una baja densidad de población, en contraste con los territorios que la rodean, los Pirineos tienen una importancia excepcional en cuanto a la generación de recursos hídricos que excede con mucho el ámbito de la propia cordillera, ya que los recursos hídricos de los Pirineos alimentan las necesidades de agua para la agricultura, la industria y el abastecimiento de una amplia región que se extiende en sus piedemontes. En un volumen previo se ha estudiado el uso de los recursos hídricos de los Pirineos y su evolución reciente, y las previsiones futuras bajo escenarios de cambio climático (Beguería, 2023). En esta sección se hace un breve resumen de los resultados más notables de este trabajo, como contexto para el presente volumen.

Los recursos hídricos de los Pirineos tienen una importancia ecológica y socio-económica fundamental, tanto en el seno de la propia cordillera como en sus extensos territorios de piedemonte.

Los inicios del aprovechamiento moderno de los recursos hídricos de los Pirineos se remonta a la segunda mitad del siglo XIX, cuando comenzaron a planificarse y, en ocasiones, a ejecutarse, las primeras infraestructuras hidráulicas de envergadura. Comenzó la construcción de presas para ampliar la capacidad de algunos lagos de alta montaña y regular los caudales de los torrentes y algunos ríos principales, y de forma paralela al desarrollo de los usos de la electricidad se instalaron las primeras centrales de producción hidroeléctrica. Este desarrollo pionero transcurrió en paralelo en ambas vertientes de la cordillera, y alcanzó su ritmo de desarrollo más elevado en la segunda mitad del siglo XX. Es precisamente a lo largo de este siglo cuando se construyen las infraestructuras más ambiciosas, en ocasiones verdaderos retos de la ingeniería para los recursos de la época. Es también a lo largo del siglo XX cuando comienzan a hacerse patentes las diferentes concepciones en cuanto a la planificación de la explotación de los recursos hídricos en las vertientes francesa y española.

Mientras en Francia se siguen construyendo un elevado número de presas de tamaño pequeño a mediano, en España se llevan a cabo grandes proyectos que dan lugar a embalses de gran capacidad, ligados al desarrollo de extensas superficies de regadío con la finalidad de transformar la economía y el nivel de desarrollo de amplios territorios al pie de los Pirineos. Este desarrollo ha dado lugar, al día de hoy, a importantes diferencias entre los dos países tanto en la gestión como en los usos de los recursos hídricos de los Pirineos.

Así, el uso total del agua de los Pirineos se cifra en la actualidad en unos 6,700 hm³ anuales, de los cuales 5.757 hm³ se consumen en España mientras que Francia utiliza 960 hm³ y Andorra 13 hm³ (Beguiría et al., 2022b). Una parte muy importante de los recursos hídricos (79%) se destina a la agricultura de regadío, aunque este uso es sobre todo predominante en España donde representa un 92% del uso total, frente al 44% de la vertiente francesa o el 16% de Andorra. El abastecimiento urbano, en cambio, tan solo representa el 4% del uso del agua de los Pirineos, con un porcentaje similar dedicado al uso industrial. Aunque pequeños en volumen, estos usos del agua tienen una gran importancia regional y estratégica, que no debe dejarse de lado. Aunque una gran mayoría de estos usos del agua se realizan fuera de los Pirineos, no hay que olvidar la importancia local de otros usos del agua en el seno de la cordillera, tanto de tipo consuntivo como no consuntivo. Además de la importancia estratégica ya mencionada del abastecimiento, que en los Pirineos adquiere un mayor relieve debido a la elevada demanda estacional por el turismo, hay que citar algunos aspectos con relación al uso del agua en el seno de la cordillera. El primero de ellos es la producción hidroeléctrica, ya que la concurrencia de abundantes recursos y fuertes desniveles ha propiciado que existan más de 300 centrales en los Pirineos, con una producción de unos 11.500 GWh al año. En segundo lugar conviene referirse a la importancia creciente del uso de recursos hídricos dentro del sector turístico, entre los que habría que integrar tanto la producción de nieve de cultivo en las estaciones de esquí como otros usos como las instalaciones termales o el riego de campos de golf. En último lugar, no hay que

olvidar la tremenda importancia del agua en todas sus manifestaciones para el mantenimiento de la calidad y variedad de los ecosistemas y paisajes de los Pirineos. Glaciares, lagos de alta montaña, nieve, surgencias, cascadas, torrentes de alta montaña... son sin duda algunos de los elementos icónicos de los Pirineos que contribuyen poderosamente al atractivo y riqueza natural y paisajística de la cordillera.

El análisis de los datos de caudales circulantes en los ríos en régimen natural de los Pirineos revela que se ha producido un descenso generalizado de todos los indicadores: caudales bajos, medios y altos, caudales de estiaje y caudales de crecida (Quintana et al., 2022a). El descenso de los caudales circulantes es muy marcado, sobre todo si se tienen en cuenta los periodos más largos (70, 60 y 50 años). Las tendencias se atenúan en los últimos veinte años, aunque siguen predominando las de signo negativo, sobre todo para los caudales bajos y de estiaje. A nivel estacional, los caudales altos característicos de la fusión nival se han venido adelantando en la estación, mientras que los estiajes se han hecho paulatinamente más largos y acentuados. Estos cambios se aprecian en ambas vertientes de la cordillera.

En las últimas décadas los caudales y regímenes hídricos estacionales han experimentado cambios notables a ambos lados de la cordillera, debidos tanto al cambio climático (principalmente al calentamiento) como a otros procesos del cambio global ligados al abandono de actividades tradicionales en los montes como la ganadería y la agricultura.

Dado que los caudales circulantes es casi la única variable del balance hídrico que se mide sistemáticamente en los Pirineos, para conocer la evolución de los distintos componentes del balance (evapotranspiración, contribución de la fusión nival, recarga de los acuíferos, etcétera) es necesario utilizar herramientas de modelización numérica que simulen el complejo funcionamiento del sistema hidrológico continental (Quintana et al., 2023a).

La implementación de varios modelos de simulación diferentes ha permitido estudiar los distintos componentes del balance hídrico (flujos

de agua y variables de estado), su distribución geográfica, estacionalidad y evolución temporal. La modelización de los distintos elementos del balance hídrico apunta a que los cambios observados en los caudales obedecen tanto a causas climáticas (principalmente el aumento de las temperaturas, puesto que las precipitaciones no acusan cambios importantes) como a cambios recientes en los usos del suelo, principalmente al aumento de la cubierta vegetal debido al abandono de actividades agropecuarias en los montes.

Las previsiones futuras indican una transición hacia unos Pirineos más secos y pobres en recursos hídricos, sobre todo durante la época estival..

La utilización de modelos hidrológicos en combinación con un conjunto de proyecciones climáticas para el siglo XXI ha permitido estimar los cambios esperables en los distintos componentes del balance hídrico de los Pirineos, junto con su nivel de incertidumbre (Quintana et al., 2023b). Los resultados muestran de forma muy consistente que en el futuro los Pirineos serán más cálidos y secos, con un incremento de la aridez tanto en el espacio como en el tiempo, salvo en las zonas más elevadas. Las simulaciones son consistentes en cuanto a la reducción de la innivación, así como en cuanto al descenso del peso relativo de la fusión nival en la generación de caudal, lo que ocasionará una transición de los regímenes hídricos nivales o pluvio-nivales actuales hacia regímenes de tipo netamente pluvial. Las aportaciones de los principales ríos pirenaicos, en consecuencia, experimentarán importantes reducciones, que varían en su magnitud en función del escenario y horizonte temporal considerados.

La reducción de las aportaciones será más acusada en la vertiente norte del macizo, donde podrían ser de promedio del orden del 20% a finales del siglo XXI, mientras que en la vertiente sur serían más moderadas con un gradiente desde la zona más occidental (con descensos del 15%) a la más oriental (10%).

Estos resultados ponen de relieve la importancia y la necesidad de abordar la adaptación al cambio climático en el ámbito de la gestión de los recursos hídricos de los Pirineos, tanto a escala local como de cuenca e incluso de cordillera.

1.2 Los casos de estudio del proyecto de cooperación transfronteriza PIRAGUA

El proyecto EFA210/16 PIRAGUA (Evaluación y prospectiva de los recursos hídricos de los Pirineos en un contexto de cambio climático, y medidas de adaptación con impacto en el territorio) es un proyecto de cooperación internacional cofinanciado por el programa INTERREG V-A España-Francia-Andorra (POCTEFA 2014-2020) y los organismos participantes: Agencia Estatal Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU), Andorra Recerca i Innovació (ARI), Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (INRAE), Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Universitat de Barcelona (UB), y Fundació Observatori de l'Ebre (OE).

Entre enero de 2018 y diciembre de 2021 PIRAGUA abordó, mediante la cooperación transfronteriza, la evaluación del ciclo hidrológico de los Pirineos en el contexto del cambio climático para mejorar la capacidad de adaptación de los territorios frente a los retos impuestos por el cambio climático y apoyar la inversión destinada a la adaptación al cambio climático de la gestión del recurso agua. Para ello, en el transcurso del proyecto se desarrollaron acciones enfocadas a:

- la mejora del conocimiento y el desarrollo de bases de datos regionales;
- el establecimiento y seguimiento de indicadores clave;
- la elaboración de escenarios futuros de recursos hídricos;
- el desarrollo de experiencias piloto en los ámbitos de la gestión de embalses, de explotaciones forestales y otros;
- la estimación de los costes asociados al cambio climático;
- la elaboración de recomendaciones sobre las adaptaciones sectoriales; y
- la transferencia de los resultados a los agentes implicados en la gestión de los recursos hídricos en el territorios del programa POCTEFA.

Los retos que abordó el proyecto PIRAGUA son los siguientes:

- Realizar una caracterización conjunta de los recursos hídricos de los Pirineos que permita conocer la evolución de las aguas superficiales y subterráneas y sus variaciones.
- Conocer la utilización de los recursos hídricos de los Pirineos, tanto en el seno de la cordillera como en sus piedemontes y área de influencia.
- Cuantificar los recursos hídricos de los Pirineos en el futuro, basándose en escenarios de cambio climático.
- Identificar y proponer acciones de adaptación al cambio climático con relación al recurso agua.

A partir de siete casos de estudio locales centrados en diferentes temáticas relacionadas con el ciclo hidrológico y los recursos hídricos de los Pirineos, se ha colaborado con los actores locales para analizar la vulnerabilidad al cambio climático de los territorios y explorar opciones de adaptación.

Los tres primeros retos se tratan en otro volumen (Beguería 2023), por lo que el presente trabajo se centra en el cuarto de los objetivos. Este reto se abordó mediante una serie de casos de estudio, desarrollados en localizaciones concretas dentro de los Pirineos o en su área de influencia en colaboración estrecha con los actores locales. El objetivo de estos casos de estudio fue realizar evaluaciones de la vulnerabilidad al cambio climático a escala local, para proponer y validar acciones de adaptación para diferentes sectores económicos y a distintas escalas. A continuación se describe brevemente el contexto (localización, objetivo, actores implicados) de cada uno de estos casos de estudio, cuya localización aproximada puede verse en la Figura 1.1.

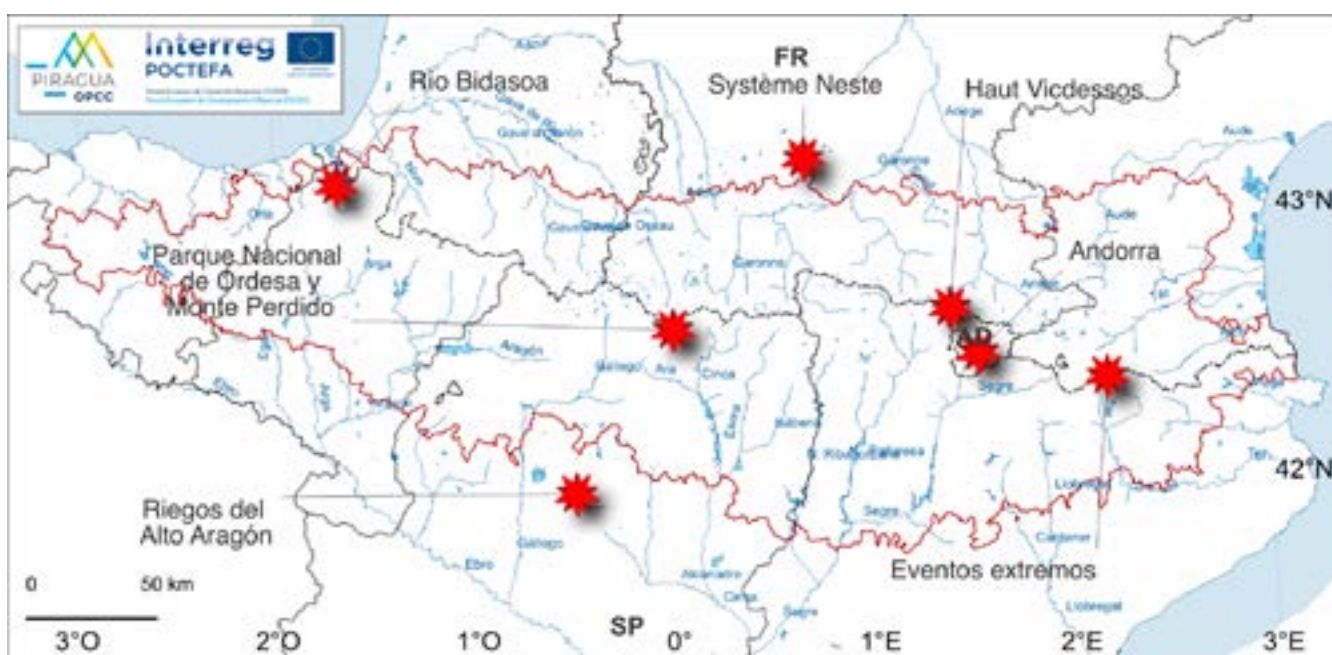


Figura 1.1. Localización de los siete casos de estudio.

1.2.1 La competencia por los recursos hídricos en Andorra

El primero de los casos de estudio presentados en este volumen (Domènech et al., 2022) analiza los recursos hídricos actuales y futuros del Principado de Andorra, donde la confluencia del cambio climático y un modelo socioeconómico basado en un uso intensivo del agua podría amenazar la sostenibilidad futura del sistema. El análisis principal se realiza mediante la herramienta WEAP (Water Evaluation and Planning System), implementando un modelo que explora la evolución futura de los recursos hídricos combinando escenarios climáticos y socioeconómicos.

Los resultados del análisis apuntan a una disminución importante de los caudales circulantes en el futuro. El patrón de cambios en su distribución a lo largo del año en las cuencas andorranas está en línea con los estimados en otras zonas de la cordillera Pirenaica y los Alpes, con un avance del deshielo, un aumento del caudal en los meses de invierno y una reducción de recurso concentrada entre mediados de primavera y verano. Se prevé que la máxima reducción de caudal se concentrará en verano donde los caudales serán claramente inferiores a los actuales. Este será el período más vulnerable y en el que habrá que destinar más recursos para evaluar el impacto en las funciones ecosistémicas de determinados tramos de los ríos.

No se prevé que la reducción de recurso condicione la disponibilidad de agua para uso humano hasta el año 2050, aunque el mantenimiento de tendencias de crecimiento podrían comprometerla a largo plazo. El mayor impacto a medio plazo se producirá en las funciones ecosistémicas de los ríos y en la compatibilidad de la conservación de estas funciones con la demanda de agua en determinados periodos y tramos, especialmente al final del verano.

Este estudio analiza también el potencial a escala de país de distintas medidas de adaptación al cambio climático en los principales sectores de actividad. En paralelo, las estrategias destinadas a mejorar la eficiencia del uso de agua en las estaciones de esquí se han implementado en dos pruebas piloto en las estaciones de Grandvalira y Vallnord.

1.2.2 Impactos del cambio climático en la gestión de embalses de producción hidroeléctrica: el caso de los valles de Nestes d’Aure y Louron

El segundo caso de estudio (Sauquet et al., 2023) aborda los impactos del cambio climático sobre la producción hidroeléctrica y la competición por los recursos en situaciones de estiaje en el futuro. Las cuestiones que rodean a la hidroelectricidad y su futuro se ilustran con un estudio de caso centrado en los embalses de montaña del sistema Neste d’Aure y Neste de Louron (región de Hautes-Pyrénées). El objetivo principal es proponer posibles trayectorias de adaptación para el manejo de estos embalses bajo condiciones de cambio climático. Para lograrlo, se abordaron las siguientes preguntas: ¿qué herramientas se deben implementar para representar la gestión de los embalses de usos múltiples, las demandas de agua—incluida la demanda de energía—, la movilización de los volúmenes almacenados en forma de nieve, etcétera? ¿Cuál es el impacto previsible del cambio climático en la gestión de los embalses y en la producción de energía? ¿Cuál es la vulnerabilidad de la cadena productiva y otros usos del agua que dependen del agua almacenada en los embalses?

El análisis se basa en una cadena de modelos que simula la evolución del recurso hídrico y las acciones humanas sobre este recurso (demandas y extracciones de agua, acciones de almacenamiento y reducción de existencias, etcétera). Fue necesario implementar un desarrollo específico de herramientas dada la

complejidad del sistema hidroeléctrico: el agua se moviliza en los embalses aguas arriba de los valles para irrigar sectores agrícolas fuera de la cuenca de Neste a través de un canal de derivación, y el conocimiento y las bases de datos sobre métodos de gestión están fragmentados.

Al igual que otras cuencas pirenaicas, el efecto del cambio climático se refleja en una menor precipitación en el futuro, una reducción de los caudales de entrada a los embalses y unos caudales de deshielo reducidos y adelantados en el año. El análisis de vulnerabilidad del sistema mostró que el potencial de producción hidroeléctrica podría verse muy reducido debido a la conjunción de la disminución de los volúmenes de agua embalsada y a la prioridad del compromiso de suministro de volumen de agua para abastecimiento e irrigación durante los estiajes.

A partir de estos análisis se discutieron diferentes opciones de adaptación con los actores principales en el territorio, así como los criterios para evaluar estas estrategias, tratando de integrar todas las dimensiones del sistema (incluyendo aspectos económicos y ecológicos). Este trabajo contribuirá en última instancia al desarrollo de trayectorias de adaptación en el territorio.

1.2.3 Adaptación al cambio climático en la agricultura de regadío: el caso de Riegos del Alto Aragón

La construcción de grandes presas y canales de distribución a lo largo del siglo XX en el Pirineo central permitió la puesta en regadío de grandes superficies en las llanuras que se desarrollan a los pies de la cordillera, asegurando la producción de alimentos y mejorando la calidad de vida de sus habitantes. Los grandes sistemas de riegos, sin embargo, arrastran problemas derivados de su diseño y concepción en una época muy diferente a la actual, y se enfrentan a nuevos retos en el siglo XXI. Entre estos destaca el previsible descenso de los recursos hídricos disponibles debido al cambio climático, aunque no hay que

olvidar otros como la reducción de la capacidad de los embalses debido al aterramiento o el incremento de los costes de producción debido a los precios de la energía.

El tercer caso de estudio analiza el sistema de Riegos del Alto Aragón en la provincia de Huesca, un sistema que disfruta en la actualidad de un adecuado nivel de sostenibilidad (Beguiría et al., 2023c). Esta situación, sin embargo, se verá amenazada en el futuro de cumplirse las proyecciones de cambio climático analizadas. En concreto, se prevé una disminución de los aportes de caudal a los embalses que alimentan el sistema, así como cambios en la estacionalidad de los aportes con mayor peso de los caudales invernales y estiajes más pronunciados y prolongados. Esto repercutirá en la sostenibilidad del sistema, reflejándose en una mayor frecuencia e intensidad de situaciones en las que no se puedan satisfacer las demandas de riego establecidas en la actualidad.

El análisis de vulnerabilidad demuestra la ineficacia de las soluciones centradas en el aumento de la oferta de agua (tanto a nivel de grandes infraestructuras de regulación hidrológica como a nivel interno mediante balsas de riego), sobre todo teniendo en cuenta las proyecciones climáticas. Los esfuerzos deben centrarse, por tanto, en asegurar la dotación actual de agua de riego, a la vez que se garantiza una mejor gestión de la demanda de agua. En un escenario de progresiva mayor escasez del recurso, es necesario plantear medidas (normativas, de gobernanza, etcétera) orientadas a maximizar la rentabilidad por unidad de agua suministrada, marginando prácticas y cultivos menos rentables. Resulta de vital importancia que exista una implicación mayor a todos los niveles, desde la Administración hasta los pequeños agricultores y los emprendedores locales, para que el sistema se pueda convertir en el modelo de agricultura sostenible de elevada productividad que necesita la sociedad del siglo XXI.

1.2.4 Impactos del cambio climático en áreas de especial valor ambientejal: presión turística, cambio climático y calidad ambiental en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido

El cuarto caso de estudio aborda el impacto del cambio climático ligado al problema de la presión turística en lugares de elevado valor ambiental (Lambán y Jódar, 2023). El Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido y Parc National des Pyrénées presentan numerosas figuras de protección ambiental a escala nacional, supranacional y transfronteriza (Patrimonio Mundial de UNESCO, Diploma del Consejo de Europa a la Conservación, Reserva de la Biosfera o Carta de cooperación entre ambos Parques, entre otras). Constituyen el mayor macizo montañoso calcáreo de Europa Occidental, lo que provoca una escasez de aguas superficiales de escorrentía ya que buena parte de la precipitación (lluvia y nieve) se infiltra en el subsuelo (recarga) alimentando los acuíferos. El aumento de la temperatura generado por el cambio climático impone una menor acumulación de nieve en la zona de recarga y una anticipación progresiva de la época de deshielo, lo que unido al corto tiempo de tránsito del agua subterránea debido a la naturaleza kárstica del terreno provoca una disminución en la cantidad y calidad del agua disponible, afectando tanto a los ecosistemas asociados como al turismo. Se ha modelado la dinámica de los recursos hídricos y evaluado la afección provocada por el turismo en uno de los sectores más visitados y vulnerables. Los resultados permiten evaluar los riesgos asociados al cambio climático en cuanto a la cantidad y la calidad de los recursos hídricos, así como proponer medidas de adaptación para asegurar una adecuada gestión y conservación de estos recursos.

Como medidas de adaptación en relación con la cantidad se proponen: almacenamiento de la precipitación mediante aljibes o depósitos adaptados, uso conjunto de aguas superficiales

y subterráneas, y construcción de pozos para el mantenimiento de caudales ecológicos en los ríos durante la época de estiaje. Como medidas de adaptación respecto a la calidad se propone el control del número de visitantes y pernотas, además de recomendaciones para la optimización en la generación y tratamiento de los residuos generados.

1.2.5 Adaptación al cambio climático desde la gestión de la funcionalidad hidrológica del territorio: el caso de la cuenca del río Bidasoa

El objetivo del quinto caso de estudio, centrado en la cuenca del río Bidasoa en Navarra, es promover la adaptación al cambio climático ligando la gestión de los recursos hídricos con la gestión del territorio, y en concreto a través de la planificación de los usos del suelo (Antigüedad et al., 2023). Partiendo del concepto de la funcionalidad hidrológica del territorio, se realiza un análisis que permite identificar zonas de la cuenca que tienen un especial valor en cuanto a la provisión de servicios hidrológicos de provisión de agua, en cantidad y calidad. Así, al igual que el carbono es el eje de las medidas de mitigación al cambio climático en una escala global, se propone que el agua sea uno de los ejes de la adaptación al cambio climático a escala local. El análisis de los servicios ecosistémicos hidrológicos busca actuar en los espacios más cambiantes del territorio para determinar cómo adaptar sus usos futuros al cambio climático desde la consideración de la mejora de los servicios hidrológicos.

Se tienen en cuenta dos tipos de usos: los consolidados en el tiempo, que no suponen cambios importantes en el estado de las masas vegetales ni del suelo; y los usos que están en situación de cambio, natural o planificado, y suponen una alteración importante. Los primeros se relacionan, sobre todo, con masas boscosas de varias decenas de años, en las que el tipo de gestión realizada no supone cambios hidrológicos relevantes a medio y largo plazos. Los segundos se relacionan con diferentes tipos de usos y

situaciones: desde prados en proceso de abandono hasta plantaciones de especies de crecimiento rápido con ciclos de rotación cortos, que pueden alterar las condiciones de la evapotranspiración y de los suelos. En este caso, en algunas zonas se propone que se prioricen los servicios ecosistémicos hidrológicos, sobre todo en aquellos lugares donde éstos se relacionen con la existencia de captaciones superficiales o subterráneas, o con la necesidad de mantener caudales ambientales. En última instancia, se busca favorecer un complementariedad de los servicios ecosistémicos en el territorio mediante un mosaico planificado de usos del suelo. Para ello es necesario establecer criterios basados en evidencias obtenidas en el terreno sobre la funcionalidad hidrológica del territorio.

1.2.6 Transformación del territorio y dinámica hidrológica en zonas de cabecera: el caso de la turbera de Bernadouze (Ariège).

El sexto caso de estudio aborda la problemática ligada al cambios de los usos del suelo en las cabeceras de los ríos de montaña, y en concreto en las áreas de turberas (Cakir et al., 2023). Durante los últimos cincuenta años se han monitorizado los cambios de los usos del suelo en los territorios de alta montaña de los Pirineos, y en concreto en la cuenca hidrográfica de Videssos situada en la región del Ariège. La cabecera de la cuenca del río Videssos contiene una zona de turbera, Bernadouze, de gran importancia ecológica y para la regulación del ciclo de agua y del carbono en la cuenca. La gestión forestal y los cambios asociados en la cobertura del suelo pueden tener un efecto sobre el funcionamiento hidrológico de la cuenca y sobre las exportaciones fluviales de carbono. A partir de los datos obtenidos mediante sensores continuos en la turbera de Bernadouze durante los últimos diez años, y gracias a la aplicación de la modelización hidrológica, se están obteniendo resultados y nuevas perspectivas que pueden utilizarse para una mejor gestión conjunta de

los entornos de alta montaña, en especial los entornos mixtos de bosques y humedales. En el caso de estudio se probaron escenarios con y sin gestión forestal para comprender el impacto de la silvicultura en los distintos procesos y componentes del balance hidrológico de la cuenca. Las tendencias apuntan a que la capa de nieve invernal tendrá una duración más corta y que el deshielo tendrá a ser más temprano en el futuro, lo que resultará en una suavización de la variabilidad hidrológica estacional. Si este cambio en la hidrología no va asociado con un uso racional de los suelos y los bosques, la erosión del suelo podría agudizarse.

1.2.7 Impactos de las inundaciones y eventos extremos en los recursos hídricos de los Pirineos en un contexto de cambio climático.

Las medidas de adaptación evaluadas en el séptimo caso de estudio se centran en el impacto del cambio climático a través de los riesgos vinculados con los recursos hídricos, principalmente las inundaciones (Llasat-Botija et al., 2023). En primer lugar se analiza la importancia de las inundaciones en los Pirineos y su relación con los recursos hídricos, y a continuación se presentan tres propuestas. La primera está dirigida a las autoridades y organismos de gestión, ya que ofrece una información útil para la coordinación y el aprendizaje mutuo, en la que se han integrado todas las medidas de adaptación frente al riesgo de inundación en la actualidad. Así pues, se analizan los diferentes tipos de medidas de adaptación ya existentes en el territorio pirenaico, incluyendo un mapeo de las mismas. La segunda propuesta también se basa en la mejora del conocimiento, pero en este caso ofrece información totalmente novedosa. Consiste en la primera cartografía de episodios de inundaciones a escala municipal realizada hasta ahora para el conjunto de los Pirineos. La base de datos que se ha compilado cubre el periodo 1981-2015, conteniendo además información sobre impactos

y características espacio-temporales de los eventos de inundación.

El análisis de esta base de datos permite dar a conocer un fenómeno que es mucho más frecuente y dañino de lo que se cree habitualmente, y que afecta al suministro y a la calidad del agua. Es una herramienta útil para la toma de decisiones y la coordinación de actuaciones interregionales por parte de las administraciones competentes, pero también es útil para la población en cuanto a la mejora del conocimiento del territorio y para promover el despertar de la memoria histórica con respecto al riesgo de inundación. La tercera propuesta se centra en el desarrollo de una aplicación de móvil en diversas lenguas del territorio pirenaico y en inglés, con el objetivo de hacer a la ciudadanía participe de la importancia del conocimiento sobre el riesgo de inundaciones y favorecer su empoderamiento frente a los extremos hidrometeorológicos y el cambio climático, además de servir para la recopilación de información para mejorar el conocimiento del impacto local de estos fenómenos.

1.3 Principios transversales de la adaptación al cambio climático

Los casos de estudio presentados en este volumen corresponden a distintos aspectos relacionados con la adaptación al cambio climático en lo que respecta a los recursos hídricos. Cada estudio de caso permite destacar conclusiones y recomendaciones sobre los temas tratados como la gestión conjunta de los usos de agua y de los suelos, la importancia del conocimiento y del trabajo con escenarios, la valoración de los servicios ecosistémicos o la prevención de riesgos. A pesar de la disparidad temática, territorial e incluso metodológica, a lo largo de todos estos ejemplos aplicados podemos encontrar algunos principios transversales, que consideramos fundamentales para abordar la adaptación al cambio climático sea cual sea el contexto o la situación de un territorio. A continuación se desarrollan algunos de estos principios transversales, cuya aplicación se materializa en la práctica totalidad de los casos de estudio abordados.

1.3.1 Importancia de los modelos de vulnerabilidad al cambio climático

Los modelos de vulnerabilidad al cambio climático (MVCC) permiten cuantificar la predisposición de un sistema a verse afectado negativamente por las consecuencias del cambio climático, y pueden aplicarse tanto a organismos individuales como a sistemas complejos (Joyce y Janowiak, 2011). Los MVCC integran la información científica y de expertos disponible para realizar un análisis cuantitativo sobre la manera en que recursos, ecosistemas u otros elementos pueden verse afectados por el cambio climático, incluyendo los eventos extremos. Este análisis parte de la premisa de que la vulnerabilidad de un sistema está determinada, por un lado, por la naturaleza y magnitud del cambio climático al que está expuesto, y por otro lado por la sensibilidad del sistema a los cambios y su capacidad de adaptación.

Los MVCC, por tanto, pueden ofrecer información valiosa que sirva como base para promover acciones de adaptación al cambio

climático sobre una base informada. En sí mismos, los modelos de vulnerabilidad no establecen prioridades sobre las decisiones a tomar, pero permiten evaluar las posibles consecuencias de ciertas decisiones sobre un escenario de continuidad, contrastar las consecuencias de diferentes alternativas, e identificar qué elementos del sistema son más vulnerables y deberían ser objeto de una monitorización cuidadosa. Generalmente los MVCC incluyen información sobre distintas opciones de adaptación disponibles para los administradores, o que pudieran implementarse en el futuro, y evalúan estas opciones mediante simulaciones bajo distintos escenarios.

Los modelos de vulnerabilidad permiten analizar el grado de afección del cambio climático sobre un organismo o sistema, y evaluar las consecuencias de distintas estrategias de adaptación. Esta información, junto con una adecuada evaluación y comunicación de las incertidumbres asociadas a los distintos escenarios, es el pilar fundamental para un adecuado proceso de toma de decisiones y la puesta en marcha de medidas de adaptación eficaces.

Un aspecto fundamental de los MVCC es la cuantificación y comunicación eficaz de las incertidumbres. Estas incertidumbres pueden tener diferentes orígenes. En primer lugar, las propias proyecciones del clima futuro en condiciones de cambio climático están sujetas a una importante incertidumbre, especialmente cuando se intenta descender a escalas espaciales locales. También existe incertidumbre en cuanto a la posible evolución de los indicadores socioeconómicos relevantes para un determinado sistema, como por ejemplo la evolución de la demanda o los precios de determinados bienes o servicios. Finalmente, existe incertidumbre asociada a los propios modelos de vulnerabilidad. Para ello, en los análisis de vulnerabilidad con frecuencia se utilizan múltiples escenarios de condiciones futuras, incluyendo tanto distintas proyecciones de cambio climático como escenarios de forzamiento (itinerarios de emisiones de gases de efecto invernadero) y escenarios socioeconómicos y de alternativas de

gestión. Idealmente, también se pueden utilizar distintos modelos de vulnerabilidad para evaluar la incertidumbre asociada al propio modelo. Esto da lugar a no una única estimación del impacto del cambio climático en un momento del futuro, sino a toda una gama de futuros posibles, cada uno de los cuales se asocia a un grado de posibilidad determinado. De esta manera es posible explorar las áreas de incertidumbre relacionadas con distintas alternativas de gestión, lo que puede también guiar la toma de decisiones. Sin embargo, la experiencia ha demostrado en no pocas ocasiones que la gestión adecuada de la incertidumbre plantea un desafío importante para los tomadores de decisiones, siendo este uno de los aspectos en los que conviene dedicar mayores esfuerzos para lograr una óptima transmisión de la información que guíe el diseño y la puesta en marcha de medidas de adaptación.

1.3.2 Importancia de conocer los servicios ecosistémicos y promover soluciones basadas en la naturaleza

Las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN) se definen como acciones destinadas a proteger, gestionar de forma sostenible y restaurar los ecosistemas para abordar los desafíos sociales y económicos de una manera eficiente y adaptable, al tiempo que se garantiza el bienestar humano y se protege la biodiversidad. Planteado en 2009 durante la Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, el concepto de SBN se incluyó en el programa global de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza - UICN en 2013. A raíz de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático de 2015 (COP21), y más tarde con motivo del Congreso Mundial de la Naturaleza de 2016, las SBN han visto reconocido su lugar a nivel internacional como un medio para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (UICN, 2018).

Las SBN se pueden desglosar en tres tipos de acciones, que se pueden llevar a cabo de forma

independiente o en combinación:

- acciones para la preservación de ecosistemas funcionales en buenas condiciones ecológicas;
- acciones para mejorar la gestión de los ecosistemas garantizando un uso sostenible del territorio;
- acciones para promover la restauración de ecosistemas degradados o la creación de nuevos ecosistemas.

Las SBN promueven los servicios proporcionados por ecosistemas bien conservados, restaurados o gestionados de forma sostenible. Estos servicios ecosistémicos son los beneficios que los seres humanos obtienen del funcionamiento normal de los ecosistemas. Las SBN representan, por tanto, una alternativa económicamente viable y sostenible, y en ocasiones menos costosa a largo plazo que las inversiones tecnológicas o la construcción y mantenimiento de infraestructuras.

Por la multiplicidad de sus beneficios para las sociedades humanas y la biodiversidad, las soluciones basadas en la naturaleza deben explorarse y promoverse como medidas eficaces de adaptación al cambio climático.

La implementación de SBN para abordar problemas concretos permite también evitar los impactos en los entornos naturales vinculados a las infraestructuras de ingeniería convencionales, así como intervenir adaptando las actuaciones realizadas a las incertidumbres asociadas al cambio climático (UICN, 2018).

1.3.3 Importancia de considerar a todos los actores

El éxito de las medidas de adaptación al cambio climático depende en gran medida del conocimiento de la población sobre el propio fenómeno a escalas global y local, y sobre sus consecuencias en sus modos de vida y seguridad (OPCC-CTP, 2021). El papel activo de los ciudadanos y su implicación directa son, por tanto, fundamentales para la

adaptación al cambio climático. Los cambios en el comportamiento de los ciudadanos y consumidores hacia modelos más sostenibles pueden ocurrir de forma sorprendentemente rápida, como la experiencia nos ha enseñado, existiendo herramientas muy útiles como la educación, la concienciación, la ciencia ciudadana, la observación y el seguimiento de los impactos ambientales, el compromiso cívico y la innovación social.

Las iniciativas de adaptación al cambio climático tienen necesariamente que nacer de procesos participativos que faciliten el intercambio de información y conocimientos entre los tomadores de decisiones (políticos, gestores), los expertos (científicos) y los actores locales y poblaciones que viven en los territorios afectados por las medidas de adaptación.

Para cambiar comportamientos y desarrollar acciones más amplias a favor de la adaptación al cambio climático es necesario involucrar y colaborar con todos los actores, es decir, las personas que piensan, hacen, usan y viven en los territorios. La implicación activa de los actores locales, incluyendo los expertos pero también al conjunto de la sociedad civil, en la observación de la evolución de los territorios, en el diagnóstico de los impactos climáticos, en el diseño de posibles medidas de adaptación, en la toma de decisiones, y en el seguimiento y evaluación de las medidas implementadas, son elementos imprescindibles. El diálogo entre el conocimiento común o local y el conocimiento experto debe alentar a los actores del territorio a apropiarse del diagnóstico de los impactos del cambio climático, lo que podría establecer mejor las estrategias o acciones locales de adaptación. El co-desarrollo de respuestas locales, la experimentación, los proyectos piloto, los juegos serios, y otras técnicas, son prácticas que pueden promover la participación de las partes interesadas, y que deben utilizarse en cualquier experiencia sobre adaptación al cambio climático (RECO, 2021).

2. Gobernanza de los recursos hídricos de los Pirineos y estrategias de adaptación

Fabienne Sans (FSVA Eurl), Santiago Beguería (CSIC)

En este capítulo se analiza la gobernanza de la gestión de los recursos hídricos en el territorio pirenaico. Se trata de un sistema complejo en el que confluyen varias agencias de cuenca de índole nacional y otras de tipo regional o autonómico, y donde se superponen las legislaciones europeas y nacionales. La principal herramienta de planificación y gestión de los recursos hídricos son los planes de cuenca, que recogen cada vez con mayor relevancia el análisis de la vulnerabilidad ante los efectos del cambio climático y la necesidad de implementar estrategias de adaptación.

Desde un punto de vista más amplio, tanto a nivel europeo como a niveles nacional y regional o autonómico se han desarrollado planes de adaptación al cambio climático. Destaca, como iniciativa transfronteriza y pluri-regional la Estrategia pirenaica del cambio climático desarrollada en el marco de la Comunidad de Trabajo de los Pirineos (CTP). Ninguna de estas estrategias identifica los recursos hídricos como uno de los ejes principales de la adaptación al cambio climático, si bien la importancia del agua y de los recursos hídricos se reconoce y aparece, de forma transversal, en diferentes ocasiones. No existe ninguna iniciativa de índole regional que aborde de manera específica la adaptación al cambio climático en la gestión de los recursos hídricos.

*Citar como: Sans, F., Beguería, S. 2023. Gobernanza de los recursos hídricos de los Pirineos y estrategias de adaptación. En (Beguería et al., 2022) Adaptación al cambio climático en la gestión de los recursos hídricos de los Pirineos. Memorias científicas del proyecto PIRAGUA, vol. 2. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Zaragoza, España, 17-34
<https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14684>*

2.1. Gobernanza de los recursos hídricos de los Pirineos

2.1.1 Contexto institucional e histórico

Las principales diferencias en la gobernanza del agua en Francia, Andorra y España tienen su origen en los diferentes contextos institucionales e históricos en cada uno de los tres países. A continuación presentamos un breve resumen del contexto institucional y su desarrollo histórico en cada uno de los tres países.

Francia reconoció la importancia de la gestión de las cuencas hidrográficas en 1964. La creación de agencias financieras autónomas se produjo en un momento en el que la cuestión dominante en la gestión del agua era la lucha por reducir la contaminación de los ríos. Las oleadas de descentralización de principios de los años ochenta (1982-1983) y luego la ley del agua de 1992 reforzaron el papel de las agencias respectivas en las seis demarcaciones hidrográficas metropolitanas.

Dos niveles de gestión entrelazados prefiguraron la gestión francesa del agua, que sigue vigente en la actualidad a través de dos herramientas: la planificación de la gestión a escala de demarcaciones hidrográficas (SDAGE, Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux); y la gestión a escala de subcuencas (SAGE, Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux) (Zamarbide et al., 2018). A nivel local, los documentos de planificación relativos a los recursos hídricos deben ser compatibles con el SDAGE.

España es un país con diecisiete comunidades autónomas. Tienen su propio gobierno pero no gozan de autonomía judicial. La autonomía financiera de cada comunidad también varía. El reconocimiento oficial de la cuenca hidrográfica como entidad de gestión relevante fue ratificado por real decreto en 1926, aunque se observan intentos anteriores (mediados del siglo XIX). A finales de los años 70 y principios de los 80, las regiones autónomas se convirtieron en el nuevo nivel administrativo competente en materia de gestión del agua, y el proceso de transferencia de competencias finalizó a principios de los años 2000. La determinación

de las competencias entre niveles se basa en un criterio geográfico: los ríos y cauces que discurren dentro de una misma comunidad autónoma son competencia exclusiva de la región; mientras que los ríos y cauces que discurren más allá de los límites de una comunidad son competencia del Estado a través de las Confederaciones Hidrográficas (CCHH). España tiene diez ríos “transregionales”, cuatro de los cuales son transnacionales. Al igual que Francia, la gestión del agua en España cuenta con dos herramientas de planificación diferenciadas en dos niveles: i) un Plan Hidrológico Nacional, que “contiene las medidas necesarias para la coordinación de los Planes Hidrológicos de las demarcaciones, las soluciones y alternativas propuestas, la previsión y las condiciones de las transferencias de recursos hídricos entre territorios de las distintas cuencas”; y ii) en el nivel inferior, los Planes de Gestión de las Demarcaciones Hidrográficas. Si las demarcaciones hidrográficas se encuentran dentro de los límites de una comunidad autónoma, entonces son gestionadas por las comunidades autónomas. Si las demarcaciones hidrográficas son cuencas transregionales, están sujetas a un plan de gestión bajo la autoridad de la administración central, a través del CCHH. Históricamente, los concesionarios han sido los interlocutores privilegiados de la CCHH. Integran la CCHH a través de órganos de gobierno: “Junta de Gobierno” (equivalente a un consejo de administración) y órganos de gestión: “Asamblea de Usuarios”, “Comisión de desembalse”, “Juntas de explotación” Son los CCHH los que cobran las tasas. Por lo tanto, tienen sus propios medios financieros (Zamarbide et al., 2018).

Andorra, por su parte, es un país estructurado en siete parroquias que representan las divisiones administrativas locales y que poseen su propia autonomía ejecutiva y financiera en materia de recursos naturales (bosques, agua, ganadería). Cada parroquia tiene su gobierno local materializado en los siete Comuns, uno para cada parroquia, que ejerce la competencia en el recurso agua. Los Comuns son corporaciones públicas con personalidad jurídica y potestad normativa local, sometida a la ley, en forma de ordenanzas, reglamentos y decretos. Andorra también se estructura con el Consell General

(Parlamento) y la Administración General (Gobierno). El Gobierno tiene el poder ejecutivo del Estado y lleva a la práctica las leyes aprobadas por el Consejo General. Alguna de estas leyes afecta a la gestión del agua y a la conservación de los ecosistemas acuáticos de Andorra (Doménech et al., 2022). Así, las competencias en gestión del agua se dividen entre las diferentes administraciones, los Comuns, y el Gobierno. La captación, tratamiento y distribución de agua potable depende de los Comuns. También depende de los Comuns la construcción, operación, mantenimiento y conservación de los colectores de aguas residuales y pluviales. Sin embargo, el Gobierno es responsable de la construcción, operación, mantenimiento y conservación de los colectores generales de aguas residuales. Un colector general tiene la función de transportar el agua residual a las plantas de tratamiento de aguas residuales, y los colectores comunales son aquellos cuya función es la de recoger el agua a los colectores generales.

El tratamiento de aguas residuales es responsabilidad del Gobierno. En este sentido, ya en 1996 el Gobierno desarrolló y aprobó el Plan de Saneamiento del Principado de Andorra, cuyos objetivos se basan en:

- la reducción progresiva de la contaminación de las aguas y cauces de los ríos, de acuerdo con las directrices europeas sobre tratamiento de aguas residuales, como la Directiva 91/271 / CEE, entre otras;
- el mantenimiento de caudales mínimos en los ríos (Reglament de Protecció dels Hàbitats Aquàtics);
- la prevención de la contaminación de los acuíferos;
- el establecimiento de mecanismos de control;
- la promoción de la conciencia social sobre el uso adecuado de los recursos hídricos.

El plan de saneamiento dividió al país en 4 sistemas de saneamiento según la orografía del país. Cada sistema de saneamiento cuenta con una red general de colectores y una planta de tratamiento de aguas residuales.

El territorio pirenaico está dividido administrativamente en siete cuencas hidrográficas, siendo las dos más importantes la del Ebro y la del Adour-Garonne. Como consecuencia, desde el punto de vista de la administración de los recursos hídricos, la región de los Pirineos está repartida entre varios organismos. Estos aparecen delimitados en la Figura 2.1. Se trata, de oeste a este, de la Confederación Hidrográfica del Cantábrico (CHC), la Agencia Vasca del Agua / Ur Agentzia (URA), la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE), la Agencia Catalana del Agua / Agencia Catalana de l'Aigua (ACA), el Ministeri de Medi Ambient, Agricultura i Sostenibilitat de Andorra (MMAAS), la Agence de l'eau Adour-Garonne (AEAG), y la Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse (AERMC). Estos organismos dependen a su vez de diferentes administraciones, como son el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico del Gobierno de España (CHC, CHE), el Gobierno Vasco (URA), la Generalitat de Catalunya (ACA), el Gobierno de Andorra (MMAAS), y el Ministerio para la Transición Ecológica de Francia (AEAG, AERMC).

2.1.2 Planes de gestión de cuenca y adaptación al cambio climático

Los principales instrumentos de la política europea de aguas que rigen la gobernanza de la gestión del agua son la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/CE) y la Directiva sobre Inundaciones (Directiva 2007/60/CE).

La Directiva Marco del Agua (DMA), aprobada en 2000 y la piedra angular de la política europea de aguas, tiene como objetivo lograr una gestión sostenible del agua a largo plazo basada en un alto nivel de protección del medio acuático a través de un buen estado ambiental de todas las masas de agua. La propia Directiva no se refiere explícitamente a la adaptación al cambio climático. Sin embargo, en 2009 los Estados de la UE acordaron que las amenazas relacionadas con el clima y la planificación de la adaptación deberían integrarse en los planes hidrológicos de cuenca elaborados en el marco de la DMA (Comunidades Europeas, 2009).



Figura 2.1. Delimitación de las administraciones de los recursos hídricos en los Pirineos: Confederación Hidrográfica del Cantábrico (CHC), Agencia Vasca del Agua / Ur Agentzia (URA), Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE), Agencia Catalana del Agua / Agencia Catalana de l'Aigua (ACA), Agence de l'eau Adour-Garonne (AEAG), Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse (AERMC) y el Ministeri de Medi Ambient, Agricultura i Sostenibilitat de Andorra (MMAAS)

(Fuente: Beguería 2023)

La Directiva sobre inundaciones, adoptada en 2007, tiene por objeto evaluar y gestionar las inundaciones de manera coherente en toda la UE e integra directamente la consideración de los impactos del cambio climático en su aplicación. Los Estados miembros deben evaluar los riesgos de inundación en su territorio y preparar planes de gestión del riesgo de inundación (PGRI) teniendo en cuenta los impactos del cambio climático.

La última actualización sobre los planes hidrológicos de cuenca se describe en el 5º Informe de Implementación de la Comisión Europea, adoptado en febrero de 2019 (Comunidades Europeas, 2019), que indica que abordar los impactos del cambio climático sigue siendo un desafío importante para los futuros ciclos de implementación de la DMA. Aunque la mayoría de los Estados miembros han tenido en cuenta el cambio climático al elaborar los últimos planes de gestión de los recursos hídricos, la eficacia de los métodos de protección contra el cambio climático no está clara y, en general, las infraestructuras verdes y las medidas de retención de agua están infrautilizadas. La Estrategia de la UE para la Adaptación al Cambio Climático (2021) recomienda encarecidamente las soluciones basadas en la naturaleza, ya que son especialmente adecuadas para aumentar la resiliencia climática a los impactos del agua (Climate-ADAPT, 2022).

En Francia, las estrategias de adaptación al cambio climático en el ámbito del agua entran ahora en el ámbito de los planes hidrológicos de cuenca conocidos como Planes Maestros para el Desarrollo y la Gestión del Agua (SDAGE). Las SDAGEs, establecidas cada cinco años desde 1992 en cooperación con las partes interesadas, definen las principales orientaciones estratégicas de las agencias francesas del agua. Los objetivos se definen de acuerdo con el marco regulatorio francés y las directivas europeas, en particular la Directiva Marco del Agua (Sauquet et al., 2023). La agencia de agua Rhône Méditerranée Corsica publicó su Plan de Cuenca de Adaptación al Cambio Climático en 2014. En 2018, la agencia de agua Adour-Garonne publicó un Plan de Adaptación al Cambio Climático (CSHF) redactado en consulta con las partes interesadas

locales. Este plan formaliza las principales orientaciones estratégicas para volver al equilibrio recurriendo a un panel de posibles acciones concretas.

Sus planes se basan en síntesis de conocimiento del impacto del cambio global en la gestión del agua, llevadas a cabo por institutos de investigación en el marco de asociaciones. La estrategia de adaptación se basa en parte en un análisis de la vulnerabilidad en diferentes sectores relacionados con el agua (erosión costera, recursos de aguas superficiales y subterráneas, humedad del suelo, biodiversidad y calidad del agua). Las seis agencias de agua publicaron conjuntamente recomendaciones para que los actores participen en estrategias de adaptación en 2018 en el informe “Agua y cambio climático - Actuar para no sufrir”. Estas medidas no son exhaustivas y pueden aplicarse a nivel local en función de su pertinencia y eficacia. Las agencias francesas del agua sugieren identificar qué sector / dominio sería altamente sensible al cambio climático. Esto permitirá identificar prioridades de acción. Fomentan acciones inadvertidas y multifuncionales en el contexto de un futuro incierto. Las acciones sin arrepentimiento son acciones beneficiosas independientemente de la magnitud del cambio climático. Las acciones multifuncionales, beneficiosas para el agua, la biodiversidad, el almacenamiento de carbono o el suelo, permitirán cumplir varios objetivos. También sugieren definir estrategias de adaptación por territorio o sector a nivel local (Sauquet et al., 2023).

En España, mediante la planificación hidrológica se persigue alcanzar el buen estado y la adecuada protección del dominio público hidráulico (DPH) y de las aguas, la satisfacción de las demandas de agua, junto al equilibrio y armonización del desarrollo regional y sectorial. En esencia se trata de una herramienta de gestión adaptativa, que se evalúa y revisa con una periodicidad de 6 años.

El nuevo Plan Hidrológico del Ebro 2022-2027 (PHDE) acuerda especial atención a la toma en cuenta del cambio climático (CHE, 2021). A modo de ejemplo, en los planes hidrológicos desarrollados por la Confederación Hidrográfica del Ebro se ha venido considerando una reducción de las aportaciones naturales en la

cuenca debido al cambio climático del 5% (a partir de 2039). Esta reducción supone, de forma global, una variación en las aportaciones totales de la demarcación. Es fundamental destacar que la reducción de los recursos es uno de los aspectos principales en la redacción del nuevo PHDE, al tener importantes repercusiones en el establecimiento de las nuevas asignaciones y reservas. Además, y para alcanzar conclusiones que tengan como base el principio de cautela, se ha considerado un escenario que tenga en cuenta una reducción de recursos del 20% (escenario 2070-2100).

Sin embargo, todavía no se han desarrollado planes de adaptación al cambio climático en las cuencas que analicen la vulnerabilidad frente a cambios en los recursos hídricos y que planteen medidas de adaptación en el marco de una evaluación del riesgo, como se han desarrollado en otros países. En este sentido la Comisión Europea, en su informe de evaluación de los planes hidrológicos de segundo ciclo, reconoce que los efectos del cambio climático han sido tomados en consideración por los planes españoles. Sin embargo, la Comisión también entiende que no aparecen claramente identificadas las medidas de adaptación que se deberán adoptar para afrontar las presiones significativas que pueden agudizarse por efecto del cambio climático (Comisión Europea, 2019). Esta revisión del plan hidrológico trata de dar una primera respuesta a los nuevos requisitos a través de la incorporación de varios contenidos referidos a los efectos del cambio climático (CHE, 2021).

El SDAGE Adour-Garonne 2022-2027 integra los principios fundamentales del CSHF 2018, en una nueva orientación que describe los principios transversales impuestos en todos los temas. Reúne las medidas transversales del SDAGE 2016-2021, concretamente el principio de no deterioro y la reducción del impacto de Instalaciones, Obras, Obras, Desarrollos (IOTA) así como la implantación de la secuencia “Evitar-Reducir-Compensar” (ERC). El SDAGE debe garantizar una mayor eficiencia en el uso del agua y la lucha contra el desperdicio del recurso, con el objetivo de garantizar el acceso a agua de calidad en cantidad suficiente para todos los usos, en un contexto de escasez del recurso.

Por último, el SDAGE apoyará el desarrollo de actividades y usos del suelo compatibles con los recursos hídricos disponibles localmente, teniendo en cuenta los riesgos naturales. El objetivo es identificar e implementar posibles escenarios para adaptar las actividades intensivas en agua en regiones actualmente en déficit: gestión de extracciones, desarrollo de sectores agrícolas ahorradores de agua, limitación de la impermeabilización del suelo y mejora de la infiltración de agua de lluvia, etc.

Más allá de la gestión cuantitativa, el proyecto SDAGE se centra en la restauración de los ríos vivos y la lucha contra la contaminación, lo que ayudará a limitar los impactos del cambio climático al promover la resiliencia del medio ambiente acuático. Todas estas medidas cumplen con las expectativas marcadas por los objetivos nacionales, europeos e internacionales (Comité de Bassin Adour-Garonne, 2021).

2.2. Estrategias de adaptación al cambio climático con relación a los recursos hídricos

2.2.1 Contexto internacional y europeo

A nivel internacional, la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible se adopta durante la Cumbre de la Asamblea General de las Naciones Unidas en Nueva York los días 26, 27 y 28 de septiembre de 2015. Es un plan de acción que tiene como objetivo erradicar la pobreza, proteger el planeta y garantizar la prosperidad. Establece 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), con metas que deben alcanzarse para 2030 en cada objetivo. Algunos de ellos se relacionan directamente con el cambio climático, como el ODS 13 que tiene como objetivo “tomar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus impactos” frente a los peligros naturales. Además, existen otros ODS relacionados con los impactos del cambio climático, como el ODS 14 sobre “protección de la fauna y flora acuáticas”, el ODS 15 sobre “protección de la fauna y flora terrestres” y el ODS 6 sobre “garantizar el acceso al agua y el saneamiento para todos y garantizar la gestión sostenible de los recursos hídricos”.

El cambio climático también es objeto de un acuerdo internacional, el Acuerdo de París, adoptado el 12 de diciembre de 2015 en la COP21. Este es el primer acuerdo adoptado universalmente en el ámbito del cambio climático, y de carácter vinculante. Establece objetivos específicos en su artículo 2: limitar el aumento de la temperatura a 1,5 °C por encima de los niveles preindustriales, reforzar la capacidad de adaptación a los efectos adversos del cambio climático, promover la resiliencia a estos cambios y el desarrollo de bajas emisiones de gases de efecto invernadero.

Por último, es importante recordar que el cambio climático es monitoreado por el IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático), un organismo creado en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). La misión PRINCIPAL del IPCC es evaluar el estado más avanzado del conocimiento sobre el cambio climático, sus causas e impactos. Publica regularmente informes, el último “Cambio

Climático 2021: La Base Científica”, publicado el 9 de agosto de 2021, es la primera parte (de tres) del sexto informe de evaluación del IPCC, cuyas otras dos partes, sobre impactos y soluciones, se completarán en 2022.

Estos compromisos internacionales se reflejan en la voluntad de aplicar políticas a escala europea, nacional y regional.

A nivel de la Unión Europea, el Pacto Verde Europeo, presentado por la Comisión Europea el 11 de diciembre de 2019, es un conjunto de iniciativas políticas destinadas principalmente a lograr la neutralidad de carbono para 2050. Para ello, el Pacto Verde Europeo debe movilizar a todos los sectores de la economía (energía, industria, edificios, etc.), con una financiación de hasta 1.000 millones de euros en 10 años. Con esto en mente, el 9 de diciembre de 2020, la Comisión Europea también presentó el Pacto Europeo por el Clima destinado a involucrar a los ciudadanos y a la sociedad en su conjunto en la acción climática. Del mismo modo, desde el 9 de julio de 2021, el objetivo de neutralidad climática de la UE para 2050 se ha convertido en vinculante para todos los Estados miembros, con la publicación de la “Ley Europea del Clima” (Reglamento UE 2021/1119).

Por último, para poner en práctica la ambición del Pacto Verde de mejorar la resiliencia del territorio europeo a los efectos del cambio climático, la Comisión Europea adoptó el 24 de febrero de 2021 su nueva estrategia europea de adaptación al cambio climático. Por lo tanto, se identifican 4 objetivos principales, con el fin de prepararse para las consecuencias inevitables del cambio climático: hacer que la adaptación sea más inteligente, más rápida y más sistemática, e intensificar la acción internacional sobre la adaptación al cambio climático.

Esta estrategia europea hace hincapié en la importancia de garantizar que el agua dulce esté disponible de forma sostenible, que el uso del agua se reduzca considerablemente y que se preserve la calidad del agua. Los principales instrumentos de la política europea de aguas para integrar estas ideas son la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/CE), la Directiva de Inundaciones (Directiva 2007/60/CE), las

diversas comunicaciones y reglamentos sobre gestión de la sequía y la Directiva revisada de Agua Potable (Directiva 2020/2184).

2.2.2 Planes nacionales de adaptación al cambio climático

A nivel nacional, Francia adoptó un primer Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) en 2011. Se destacan cinco prioridades del primer PNACC relacionadas con los recursos hídricos: i) aumentar los conocimientos sobre los efectos del cambio climático; ii) desarrollar herramientas específicas para monitorear los recursos hídricos y la asignación de agua desde una perspectiva a mediano y largo plazo; iii) fomentar el ahorro de agua y garantizar un uso más eficiente del agua; iv) promover el desarrollo de conformidad con los recursos hídricos locales disponibles; y v) considerar medidas de adaptación en la planificación de la ordenación de los recursos hídricos. La ambición es lograr una reducción del 20% en las extracciones de agua para la década de 2020.

En 2018 se adoptó un segundo PNACC, tras las consultas y la evaluación del primer PNACC. El objetivo general es implementar las acciones necesarias para adaptar, para 2050, los territorios de la Francia metropolitana y de ultramar a los cambios climáticos regionales esperados, en línea con los objetivos de los convenios internacionales descritos anteriormente. Este NAPCC se compone de seis “áreas de acción”. El área de acción “Naturaleza y Entornos” tiene como objetivo fortalecer la resiliencia de los ecosistemas para permitirles adaptarse al cambio climático y confiar en las capacidades de los ecosistemas para ayudar a nuestra sociedad a adaptarse al cambio climático, anticipando futuras transformaciones. Las medidas que deben aplicarse se refieren a diversos recursos y entornos, como el agua y los ecosistemas acuáticos, los suelos, los mares y las costas, los bosques y la biodiversidad. En el eje “Adaptación y preservación de los ambientes” se proponen varias acciones para los recursos hídricos y los ecosistemas acuáticos. Se tratará de converger una oferta prevista en declive con una demanda que, ya en algunos lugares, no está

satisfecha, en torno a dos objetivos: fomentar la sobriedad y la eficiencia de los usos y regular aguas arriba el recurso, gracias en particular a la innovación y la modificación de las prácticas; aportar, en todos los territorios, soluciones adaptadas a las necesidades y contextos locales, especialmente en el contexto de proyectos territoriales para la gestión del agua. También se tratará de seguir mejorando la calidad del agua y garantizar la seguridad sanitaria de este recurso en un contexto climático cambiante, así como de preservar los ecosistemas acuáticos.

Otras dos áreas de acción están vinculadas al enfoque del proyecto PIRAGUA:

- El área de acción “Gobernanza” tiene como objetivo fortalecer la gestión estratégica del enfoque de adaptación en una lógica de co-construcción con los niveles de gobernanza territorial, incluidos los actores locales y la sociedad civil;
- y la última esfera es el fortalecimiento de la acción internacional. Esto incluye el fortalecimiento de los mecanismos de observación y capitalización transfronterizos para identificar vulnerabilidades comunes y posibles transferencias de vulnerabilidades y también el fortalecimiento de las capacidades de adaptación de los territorios y actores transfronterizos.

En España, el segundo Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC), que abarca el periodo 2021-2030, fue aprobado en el Consejo de Ministros del 21 de enero de 2020. Este PNACC pretende dar respuesta a la creciente necesidad de adaptación al cambio climático en España, así como a sus compromisos internacionales en este ámbito.

Sienta las bases para promover, durante la próxima década, un desarrollo más resistente al clima, así como una acción coordinada y coherente para evitar o reducir los daños presentes y futuros derivados del cambio climático, y construir una economía y una sociedad más resistentes.

El PNACC 2021-2030 amplía los temas tratados,

los actores implicados y la ambición de sus objetivos. Por primera vez, el marco del PNACC establece objetivos estratégicos y define un sistema de indicadores de impacto y adaptación al cambio climático. Se distinguen 9 objetivos específicos que contribuyen de forma complementaria al objetivo general. El primer objetivo es potenciar el conocimiento sobre el cambio climático, es decir, la observación sistemática del clima, la generación de conocimiento sobre impactos, riesgos y adaptación en España y su transferencia a la sociedad. Esto permitirá definir y aplicar las correspondientes medidas de adaptación. El fortalecimiento de las capacidades de adaptación del país es un eje principal de la estrategia, así como su integración en las políticas públicas, el seguimiento y la evaluación. La coordinación administrativa y el refuerzo de la gobernanza en el ámbito de la adaptación son también objeto de un objetivo específico. Por último, se trata también de promover la participación de todos los actores, incluyendo los diferentes niveles de la administración, el sector privado, las organizaciones sociales y el conjunto de los ciudadanos, que contribuyen activamente a la construcción de respuestas a los riesgos derivados del cambio climático. La consecución de estos objetivos permitirá a España cumplir y desarrollar los compromisos adquiridos en el contexto europeo e internacional.

El PNACC 2021-2030 define y describe 81 líneas de acción sectoriales organizadas en 18 ámbitos de trabajo (Tabla 2.1). Entre ellos se diferencia uno dedicado al agua y a los recursos hídricos. En esta materia se distinguen seis (6) líneas de acción, que de manera muy sintética se describen a continuación:

- Ampliación y actualización del conocimiento sobre los impactos del cambio climático en la gestión del agua y los recursos hídricos.
- Integración de la adaptación al cambio climático en la planificación hidrológica.
- Gestión contingente de los riesgos por sequías integrada en la planificación hidrológica.
- Gestión coordinada y contingente de los riesgos por inundaciones.

- Actuaciones de mejora del estado de las masas de agua y de los ecosistemas acuáticos, con incidencia en las aguas subterráneas.
- Seguimiento y mejora del conocimiento sobre los efectos del cambio climático en las masas de agua y sus usos.

En paralelo a este plan de adaptación se ha aprobado la Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética (LCCTE). La LCCTE da un paso más y recoge en su objeto, por primera vez, las políticas de adaptación y la necesidad de definir un sistema de indicadores de impactos y adaptación al cambio climático, que facilite un seguimiento y evaluación de las políticas públicas, así como la necesidad de elaborar informes de riesgos. Así aparece la necesidad que aprobar la Estrategia del Agua para la Transición Ecológica en el plazo de un año desde la entrada en vigor de esta ley (art. 19.2), cuyos principios se corresponden con la adaptación y mejora de la resiliencia del recurso y de los usos frente al cambio climático en la identificación, evaluación y selección de actuaciones en los planes hidrológicos y en la gestión del agua (art. 19.4e).

Con la misma lógica que el PNACC francés, el PNACC español presta una atención específica a una serie de dimensiones de carácter estratégico y principios orientadores que deben facilitar la definición y el desarrollo de iniciativas eficaces en materia de adaptación.

Tabla 2.1. Principios orientadores del PNACC 2021-2030.

Generación de conocimiento

Las respuestas de carácter adaptativo deben basarse en un adecuado conocimiento de los riesgos derivados del cambio climático.

Integración en planes, programas y normativas sectoriales

La incorporación de la adaptación a las políticas sectoriales se concreta y asienta a través de su integración en los planes y programas elaborados desde las administraciones públicas, así como en las normas que regulan la actividad en cada ámbito sectorial: En el caso de Agua : Planes hidrológicos de cuenca; Planes de gestión de riesgo de inundación ; Plan Nacional de Depuración, Saneamiento, Eficiencia, Ahorro y Reutilización ; Planes especiales de sequía de los organismos de cuenca

Movilización de actores

La adaptación al cambio climático sólo puede ser concebida como un proyecto colectivo, en el que toma parte un amplio conjunto de instituciones... impulsando la información, la divulgación, la capacitación y la investigación e innovación y participación social

Seguimiento y evaluación

La planificación y desarrollo derivados del PNACC-2 tendrán un enfoque iterativo, con objeto de asegurar procesos flexibles, robustos y que eviten la maladaptación, permitiendo la integración periódica de la mejor ciencia disponible.

En Andorra desde hace unos años se han desplegado varias estrategias y legislaciones en materia de adaptación al cambio climático. A continuación, se citan las más destacadas:

- Adhesión al Convenio Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) (2011) para la implementación de los procesos relacionados con la lucha contra el cambio climático.
- Proceso Participativo sobre la Adaptación de Andorra al Cambio Climático (PAACC, 2015), para dotar al país de recursos y medidas de adaptación para convertirse en menos vulnerable a los impactos derivados del cambio climático.
- Estrategia Nacional de la Biodiversidad de Andorra (ENBA, 2016), para asegurar una acción que frene la crisis de biodiversidad en el contexto de cambio climático.
- Ley de Impulso a la Transición Energética y del Cambio Climático (LITECC, 2018), potencia y acompaña la transición hacia un nuevo modelo energético basado en el uso de energías renovables y de energía baja en Emisiones de Carbono.
- Estrategia energética nacional y de lucha contra el cambio climático (OECC, 2021) dirigida a reducir las emisiones nacionales y adaptarse a los efectos del cambio climático, de acuerdo con los objetivos del acuerdo de París del Convenio marco de Naciones Unidas sobre el cambio climático (CMNUCC)

Tanto en la Ley 21/2018 de transición energética y cambio climático (LITECC) como en la Estrategia Nacional de Energía y Cambio Climático (EENCC), aprobada en febrero de 2021, deben conducir a una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero para garantizar la neutralidad de carbono en 2050.

El documento de la EENCC está estructurado en cinco programas: el programa de descarbonización; el programa de adaptación al cambio climático y de fomento de la resiliencia; el programa de mercado nacional de créditos de carbono y otras herramientas fiscales; el programa de transición social; y el programa de innovación, investigación y observación sistemática. Los programas se desglosan además en un total de 17 actividades específicas. La actividad 7 es la principal que trata del agua: la “7. Foment de solucions basades en la natura per millorar la resiliència”.

2.2.3 Estrategias regionales y transfronterizas para la adaptación al cambio climático en los Pirineos

Todas las Comunidades Autónomas del territorio pirenaico, miembros de la Comunidad Laboral de los Pirineos (CTP), han desarrollado sus políticas regionales de cambio climático y algunas de las leyes como la Ley 16/2017 de Cataluña, de acuerdo con las directrices de las estrategias europeas y nacionales. Estas estrategias tienen varias cosas en común. Su objetivo es 2030-2050, la mayoría de los cuales se ocupan tanto de la mitigación como de la adaptación al cambio climático.

Las seis estrategias regionales y la de Andorra abordan varios temas comunes, incluidos los de interés para el proyecto PIRAGUA: agua, ecosistemas y biodiversidad, forestación, turismo, gestión de riesgos y planificación espacial.

Son realizadas por las Comunidades Autónomas en consulta y coordinación con grupos intersectoriales. Algunas estrategias como Occitania, Aragón o Cataluña incluyen medidas específicas para los Pirineos. A continuación se presenta un cuadro sinóptico de estas estrategias (Tabla 2.2).

Tabla 2.2. Presentación de las estrategias de los siete territorios de los Pirineos.

	Marco temporal	Governanza
Nouvelle Aquitaine	SRADDET 2030. Feuille de route NéoTerra 2030	Région et Etat Représentants SCOT - EPCI COPTTEC Conseil scientifique (AcclimaTerra) Citoyens (Budget part.)
Aragón	La Estrategia Aragonesa de Cambio Climático horizonte 2030 (EACC 2030)	Gobierno de Aragón - DCCEA Comisión Interdepartamental de Cambio Climático Consejo Aragonés del Clima Ciudadanos: Participa
Cataluña	Estratègia catalana d'adaptació al canvi climàtic 2021 2030 (ESCACC30)	Oficina Catalana del Cambio Climático (OCCC) Comisión Interdepartamental del Cambio Climático (CICC) Grupo de Expertos en Cambio Climático en Catalunya (GECCC) Mesa Social del Cambio Climático
Occitanie	SRADDET - Occitanie 2040 Plan Montagne 2025	Région Etat SCOT - EPCI Assemblée des territoires Parlement de la Montagne Citoyens (Budget part.)
Andorra	Estratègia energètica nacional i de lluita contra el canvi climàtic (EENCC) 2020-2050 Estrategia nacional de movilidad 2021-2050	Ministeri de Medi Ambient, Agricultura i Sostenibilitat L'Oficina de l'Energia i del Canvi Climàtic Comissió Nacional de l'Energia i del Canvi Climàtic Subcomisión permanente de trabajo técnico en el marco de la movilidad
Euskadi	Estrategia de Cambio Climático 2050 del País Vasco Proyecto LIFE URBAN KLIMA 2050 (2019-2025)	Gobierno Euskadi - DMA Comisión Ambiental del País Vasco, sección de cambio climático Grupo Técnico de Coord. de CC
Navarra	Hoja de Ruta de lucha frente al cambio climático HCCN-KLINA 2030-2050 Proyecto LIFE-IP NADAPTA-CC 2018-2025	DG de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio Comisión Interdepartamental del Cambio Climático (CICC) Plataforma multi-agente AGORA KLINA

Temas comunes: Ordenación del territorio; Energía; Transporte y Movilidad; Ecosistemas y Biodiversidad; Agua; Silvicultura; Agricultura; Turismo; Riesgos naturales; Suelo (Agricultura); Residuos; Salud; Economía circular (Andorra); Acción municipal (Euskadi, Navarra); Información - Difusión - Educación; Innovación - Investigación; Seguimiento - Evaluación

Los siete territorios miembros del CTP tienen una larga trayectoria de cooperación y en particular en materia de cambio climático con el Observatorio Pirenaico del Cambio Climático, creado en 2010. Recientemente, el CTP-OPCC ha querido ir más allá y hacer sostenible su acción climática a través del desarrollo de una Estrategia Pirenaica de Cambio Climático, EPiCC (OPCC-CTP, 2021). Esta estrategia se centra en la cooperación de los siete territorios con el fin de fortalecer, complementar y coordinar las diferentes estrategias regionales (Figura 2.2).

El EPiCC fue construido y desarrollado gracias a la cooperación y contribución de un centenar de personas de los ámbitos socioeconómico, político y científico. Esta estrategia tiene como objetivo tener en cuenta todas las contribuciones relevantes de los siete territorios fronterizos. Gracias a un proceso inclusivo y participativo, este documento se elaboró desde junio de 2020 hasta septiembre de 2021, enriquecido por las sugerencias y opiniones de todos los actores pirenaicos. A continuación se resumen las bases de esta nueva estrategia transfronteriza para los Pirineos en materia de cambio climático:

- Una visión para 2050: En 2050, los Pirineos serán un territorio resiliente a los efectos del cambio climático.
- Cinco principios fundamentales que se refieren a la cooperación transfronteriza; generación y transferencia de conocimiento, acciones innovadoras, acciones en sinergia con otras estrategias y la visibilidad de los Pirineos en Europa y en el mundo.
- Cinco objetivos estratégicos relacionados con el desarrollo del conocimiento, la gestión sostenible de la biodiversidad y los recursos naturales, la contribución a la transición ecológica y justa, la gestión coherente del territorio con respecto a los riesgos relacionados con el cambio climático y la contribución a la gobernanza que promueva el conocimiento mutuo, la cooperación y la coordinación.
- Una estrategia que se organiza en torno a cinco SISTEMAS y quince DESAFÍOS, y que se implementará a través de planes de acción para 2030 y 2050.

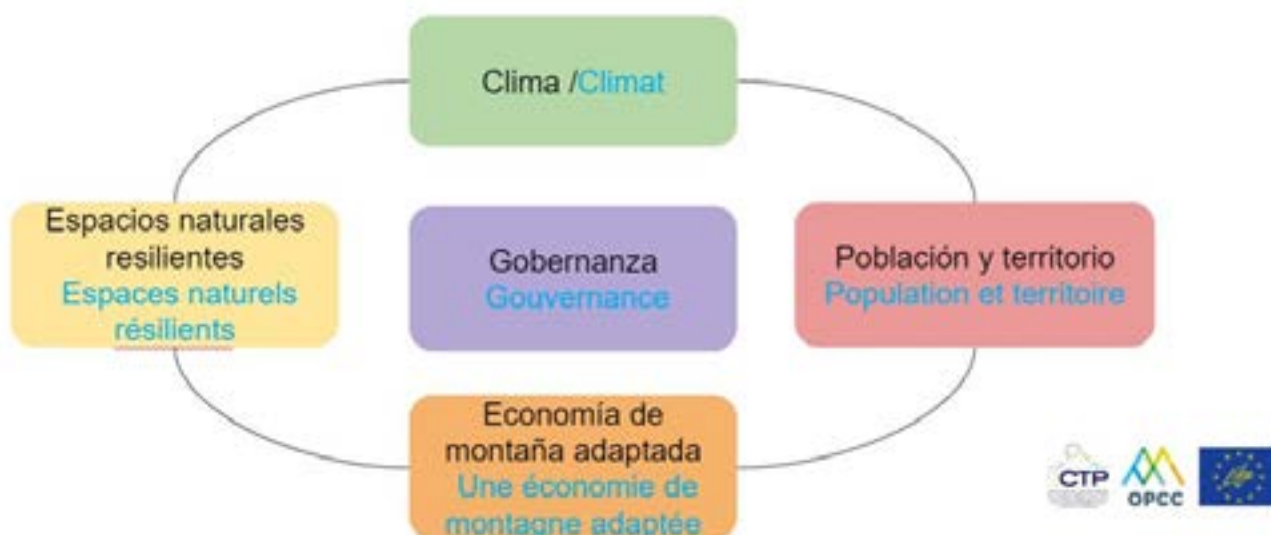


Figura 2.2. Los cinco sistemas que estructuran la Estrategia Pirenaica del Cambio Climático (EPiCC).

(Fuente: OPCC-CTP, 2021).

Para alcanzar los objetivos estratégicos sobre cambio climático para los Pirineos, se proponen 15 retos que atañen a diferentes sectores de la realidad pirenaica, pero que en conjunto permitan actuar globalmente sobre el tema del cambio climático. Se han elaborado 38 cursos de acción para concretar e indicar cómo actuar para hacer frente a los desafíos.

Para cada curso de acción, las acciones se especifican en el primer programa de acción EPiCC con el fin de alcanzar los objetivos climáticos de los Pirineos para una fecha temprana de 2030. Los retos y líneas de actuación en materia de Clima y Espacios Naturales Resilientes son los siguientes (Tablas 2.3 a 2.4).

Tabla 2.3. Retos y líneas de actuación de EPiCC para el sistema “Clima” (OPCC-CTP, 2021).

Retos	Líneas de actuación
Disponer de información climática actualizada, analizada y accesible para todos los actores de los Pirineos.	<ul style="list-style-type: none"> • Promover la innovación y la transferencia de conocimientos científicos sobre el clima. • Actualizar las bases de datos climáticos a nivel de los Pirineos y ponerlas a disposición de los territorios. • Actualizar el cálculo de los principales indicadores sectoriales del cambio climático a nivel de cordillera. • Garantizar la continuidad de los sistemas transfronterizos de seguimiento y medición de la variabilidad climática, introduciendo innovaciones tecnológicas.
Aprovechar las redes internacionales para poner de manifiesto la vulnerabilidad de las montañas al cambio climático.	<ul style="list-style-type: none"> • Participar en redes nacionales e internacionales sobre el cambio climático en las zonas de montaña. • Promover sinergias y colaboraciones con organismos europeos y transfronterizos en otras zonas de montaña.

Tabla 2.4. Retos y líneas de actuación de EPiCC para el sistema “Espacios naturales resilientes” (OPCC-CTP, 2021).

Retos	Líneas de actuación
Garantizar una gestión resistente de los ríos pirenaicos y de la calidad del agua, especialmente aguas arriba de las cuencas hidrográficas.	<ul style="list-style-type: none"> • 3.1 Evaluar la disponibilidad de recursos hídricos en base a escenarios de cambio climático y modelos de demanda, a escala del macizo. • 3.2. Promover medidas de gestión del suministro y la demanda de agua en los sectores más vulnerables.
Combatir la pérdida progresiva de biodiversidad y la degradación del paisaje ante el cambio climático y global.	<ul style="list-style-type: none"> • 4.1. Promover la gestión adaptativa del paisaje y la gestión activa del sistema de espacios naturales protegidos. • 4.2. Mejorar el conocimiento de los impactos actuales y previstos del cambio climático en hábitats y especies especialmente sensibles en los Pirineos. • 4.3 Proteger la biodiversidad y las especies más vulnerables conservando, mejorando y restaurando sus hábitats.
Anticiparse a las enfermedades y plagas emergentes.	<ul style="list-style-type: none"> • 5.1. Reforzar y coordinar los planes de prevención, seguimiento, control y gestión de especies pirenaicas vulnerables, especies exóticas invasoras y parásitos. • 5.2. Contribuir a la mejora de los sistemas de alerta transfronterizos sobre parásitos, especies invasoras y enfermedades emergentes.
Hacer frente a los extremos climáticos para preservar los servicios de los ecosistemas.	<ul style="list-style-type: none"> • 6.1. Promover la gestión adaptativa de los ecosistemas naturales y los suelos pirenaicos a favor de su multifuncionalidad, mayor resiliencia a los extremos climáticos y servicios. • 6.2. Desarrollar herramientas y metodologías para la gestión y prevención de riesgos naturales y climáticos a escala de los Pirineos, mediante soluciones basadas en la naturaleza (NBS).

Por último, el EPiCC se basa en un nuevo sistema de gobernanza, especialmente importante para la consecución de los objetivos y avances propuestos. Un sistema dinámico capaz de promover la coordinación horizontal con otras políticas (relacionadas con el cambio climático) y territorios (con estrategias regionales y locales), y la coordinación vertical (con estrategias y políticas definidas a nivel europeo y los acuerdos globales). Al mismo tiempo, la gobernanza de la EPiCC debe integrar la gran diversidad de actores y entidades científicas, económicas, sociales y políticas del Pirineo y permitir construir relaciones que se adapten en todo momento a las necesidades y cambios que requiere un futuro incierto.

2.3. Conclusiones

Los Pirineos son un territorio transfronterizo y complejo desde el punto de vista administrativo, lo que se refleja en la planificación y gestión de los recursos hídricos. Desde el punto de vista competencial, la jurisdicción hidrográfica se reparte entre cuatro organismos de cuenca supra-regionales (Confederación Hidrográfica del Cantábrico, Confederación Hidrográfica del Ebro, Agence de l'eau Adour-Garonne, y Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse) y dos organismos regionales (Agencia Vasca del Agua / Ur Agentzia y Agencia Catalana de l'Aigua), además del Gobierno de Andorra. Esta situación deriva en una gobernanza compleja en la que se solapan las legislaciones nacionales y regionales, si bien todas ellas se ajustan a las directivas europeas (principalmente la Directiva Marco del Agua, 2000/60/CE, y la Directiva sobre Inundaciones, 2007/60/CE).

Las herramientas fundamentales para la gobernanza de la gestión de los recursos hídricos son los planes de cuenca, denominados Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) en Francia y Planes Hidrológicos de cuenca (PH) en España. La elaboración y revisión de los planes de cuenca, de acuerdo con la Directiva Marco del Agua, se realiza de forma periódica y conlleva una fuerte componente de consulta y participación ciudadana. Los planes de cuenca son los encargados de definir las estrategias y herramientas para alcanzar los objetivos establecidos por las diferentes legislaciones (europea, nacionales y regionales), a la par que garantizar la satisfacción de las demandas hídricas de la región en condiciones de cantidad y calidad.

En las revisiones sucesivas de los planes de cuenca tiene un peso cada vez mayor la componente de adaptación al cambio climático. Sin embargo, en el contexto de la adaptación existe una variedad mucho mayor de instrumentos, que de nuevo se superponen en cuanto a su jurisdicción territorial. Así, bajo el paraguas de los acuerdos internacionales y de la estrategia europea de adaptación al cambio climático se han desarrollado las estrategias nacionales de adaptación en Francia y en España. También en el caso de Andorra se ha desarrollado un plan de adaptación. A ellos se superponen los planes

de adaptación desarrollados por las regiones y comunidades autónomas.

Aunque de manera inevitable todas estas estrategias abordan problemáticas similares, no ha existido hasta la fecha ningún tipo de coordinación en la elaboración de estas estrategias. En lo competente a los recursos hídricos, sería importante realizar una labor de recopilación y sistematización, incluyendo ejemplos concretos de buenas prácticas, que facilitara el avance en la adaptación al cambio climático.

3. La competencia por los recursos hídricos en la actualidad y su evolución futura: el caso del Principado de Andorra

Marta Domènech, Oriol Travesset, Marc Pons (AR+I)

Este caso de estudio analiza los recursos hídricos actuales y futuros del Principado de Andorra, donde la confluencia del cambio climático y un modelo socioeconómico basado en un uso intensivo del agua podría amenazar la sostenibilidad futura del sistema. El análisis principal se realiza mediante la herramienta WEAP (Water Evaluation and Planning System), implementando un modelo que explora la evolución futura de los recursos hídricos combinando escenarios climáticos y socioeconómicos. Los resultados sugieren una disminución en el caudal anual en el futuro. El patrón de cambios en su distribución a lo largo del año en las cuencas andorranas está en línea con los estimados en otras zonas de la cordillera Pirenaica y los Alpes, con un avance del deshielo, un aumento del caudal en los meses de invierno y una reducción de recurso concentrada entre mediados de primavera y verano. Se prevé que la máxima reducción de caudal se concentrará en verano donde los caudales serán claramente inferiores a los actuales. Este será el período más vulnerable y en el que habrá que destinar más recursos para evaluar el impacto en las funciones ecosistémicas de determinados tramos de los ríos. No se prevé que la reducción de recurso condicione la disponibilidad de agua para uso humano hasta el año 2050, aunque el mantenimiento de tendencias de crecimiento podrían comprometerla a largo plazo. El mayor impacto a medio plazo se producirá en las funciones ecosistémicas de los ríos y en la compatibilidad de la conservación de estas funciones con la demanda de agua en determinados periodos y tramos, especialmente al final del verano.

Este estudio analiza también el potencial a escala de país de distintas medidas de adaptación al cambio climático en los principales sectores de actividad. En paralelo, las estrategias destinadas a mejorar la eficiencia del uso de agua en las estaciones de esquí se han implementado en dos pruebas piloto en las estaciones de Grandvalira y Vallnord.

*Citar como: Domènech, M., Travesset, O., Pons, M., 2023. La competencia por los recursos hídricos en la actualidad y su evolución futura: el caso del Principado de Andorra. En (Beguería S., ed.) Adaptación al cambio climático en la gestión de los recursos hídricos de los Pirineos. Memorias científicas del proyecto PIRAGUA, vol. 2. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Zaragoza, España, 35-57.
<https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14684>*

3.1. Introducción

La mayoría de los principales ríos del planeta nacen en las tierras altas, y más de la mitad de la humanidad depende del agua dulce que se genera en zonas montañosas. Aunque constituyen una proporción relativamente pequeña de las cuencas hidrográficas, la mayor parte del caudal del río aguas abajo se origina en las montañas. A medida que crece la demanda, aumenta el potencial de conflicto por el uso del agua de montaña. Por tanto, la gestión sostenible en las zonas de cabecera, así como de los propios recursos, y en especial la regulación de la competencia de los diferentes usos y sectores implicados, debe convertirse en una prioridad mundial en un mundo que avanza hacia una crisis del agua en el próximo siglo (Mountain Agenda, 2001).

El agua disponible en las zonas de montaña es una limitación y al mismo tiempo una oportunidad para el turismo en estas zonas. En la mayoría de los centros turísticos de montaña de Europa, la nieve se convirtió, en el período de 1960-1980, en el principal recurso turístico. Esto llevó a una fuerte dependencia de este recurso y al desarrollo de un modelo de negocio basado fundamentalmente en la temporada invernal (Scott y McBoyle, 2007; Clarimont, 2008). Desde finales de la década de 1980, el aumento de las temperaturas y la variabilidad interanual de las precipitaciones invernales han socavado esta actividad y los centros turísticos han tenido que adaptarse mediante el desarrollo de instalaciones de producción de nieve artificial (Scott, 2006). En los Alpes franceses, en la región de l'Isère, durante el periodo de 2001-2016, el consumo de agua para nieve artificial aumentó de 600.000 m³ en el año 2000, hasta los 1,6 Hm³ en el año 2016 (Gerbaux et al., 2020). En el año 2007, y solo en las subcuencas del pirineo francés de Adour y Garonne, se consumieron unos 1,8 hm³ de agua para la producción de nieve artificial (Scott y McBoyle, 2007; Clarimont, 2008). Las estaciones de esquí de Gourette o Formigal llegan al consumo de 0,3 hm³ anuales para producción de nieve (Scott y McBoyle, 2007; Clarimont, 2008). Mientras que el consumo todas de las estaciones de esquí de Andorra llega actualmente a los 1,5 hm³ (Govern d'Andorra, 2021a). En el Pirineo, el número de cañones para producción de nieve artificial ha crecido un 13% en los últimos años 10 años (Prudencio, 2021)

Conociendo esta realidad se están buscando cada vez más alternativas como otros deportes de inviernos o actividades de montaña en verano (Reynard, 2020).

Otro de los retos a los que se enfrentan las regiones montañosas es la compatibilización entre la producción de energía hidroeléctrica y la conservación de las funciones ecosistémicas de los ríos y hábitats asociados. El aumento del número de estaciones hidroeléctricas en las montañas de Europa, como respuesta a la transición y diversificación energética ya es un hecho (Popa et al., 2020; Velychko y Dupliak, 2021). Estas estaciones, con una emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) casi nula, tienen que cumplir con diferentes regímenes de caudales ambientales. Por tanto, existe también la necesidad de optimizar las instalaciones hidroeléctricas para lograr un equilibrio con los requisitos ecológicos de los sistemas hídricos afectados y los ecosistemas terrestres adyacentes. Además, los tramos de río sin modificaciones artificiales del caudal se están volviendo cada vez más singulares en los últimos años y están amenazados con modificaciones (captaciones, obras, etc.), lo que está conduciendo a un conflicto de intereses.

Con una densidad de alrededor 23 hab/km² (OPCC-CTP, 2013), generalmente los Pirineos

son considerados un territorio poco poblado. La baja densidad a escala de macizo contrasta con zonas altamente pobladas en la cuenca de Pamplona y Andorra, o de densidad media en pequeñas ciudades del Pirineo central, y Olot, Berga y Ripoll en el Pirineo oriental. Tal como se muestra en la Figura 3.1, a excepción de la cuenca de Pamplona, el uso urbano es el dominante en cuanto a uso del agua en el resto de los territorios citados. Aunque las previsiones generales para la mitad del siglo XXI prevén una estabilización de la demanda doméstica (OPCC-CTP, 2018), si se ejecutan los planes urbanísticos actuales, algunos territorios como Andorra pueden incrementar la presión de este sector sobre los recursos hídricos (Recaño, 2021).

Las mayores extensiones agrícolas del macizo se concentran en la vertiente sur del Pirineo central, coincidiendo con las cuencas donde la extracción de agua es más intensa. El incremento previsto de demanda por el desarrollo de nuevas zonas de agricultura de regadío, especialmente en la cuenca del Ebro, puede llevar a un aumento de las tensiones y la competencia por los recursos hídricos (OPCC-CTP, 2018).

El sector industrial está poco representado en los Pirineos, únicamente con un peso significativo en uso de agua en el Pirineo oriental (asociado a la

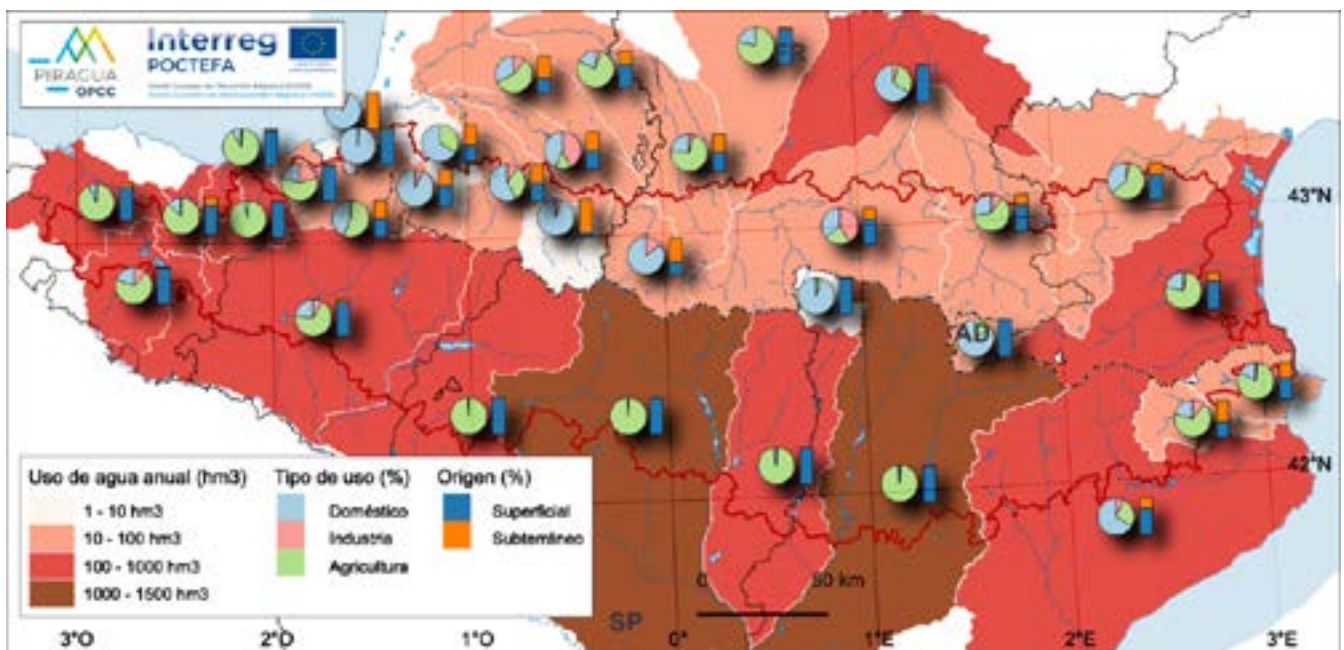


Figura 3.1. Uso del agua anual promedio por junta de explotación (hm³), uso por sectores (%) y origen del recurso (%).

(Fuente: Beguería, 2023.)

industria agroalimentaria) y en algunas cuencas de la vertiente norte.

El sector turístico, liderado por el turismo de nieve, es uno de los principales motores económicos de los Pirineos y, a su vez, un sector exigente en el uso de recursos hídricos destinados a abastecer principalmente alojamientos turísticos y estaciones de esquí. Estas se concentran principalmente en el Pirineo central, tal como se presenta en la Figura 3.2. Motivado, en parte, por el cambio climático, las estaciones de esquí pirenaicas han realizado importantes inversiones destinadas a potenciar la capacidad de producción de nieve con el objetivo de maximizar el número de días de operación. La intensificación de la innivación artificial ha incrementado la presión sobre los recursos en zonas de cabecera donde puntualmente pueden competir por el agua con pequeñas instalaciones hidroeléctricas. Este caso se da actualmente en la estación de esquí de Ordino Arcalis (Andorra) donde el mismo reservorio abastece a la producción de nieve y a una central mini hidroeléctrica dando prioridad a la innivación artificial en caso de competencia.

El aprovechamiento hidroeléctrico se concentra en ambas vertientes del macizo en las zonas central y occidental (Figura 3.2), compuesto

principalmente por instalaciones de pequeño tamaño (<100 MW) aunque también existen algunas grandes centrales.

Por último, es importante resaltar que la función ecosistémica de los ríos de cabecera de los Pirineos permite el aprovechamiento del agua y asegura su calidad en la propia cabecera y aguas abajo. Los ríos son ecosistemas dinámicos, complejos e integradores longitudinales y transversales. Las actuaciones antrópicas que provocan cambios en el régimen de caudal tienen consecuencias graves para su diversidad y funciones ecosistémicas. En este sentido, la conservación de los servicios ecosistémicos es esencial para la seguridad hídrica y la resiliencia frente al cambio climático.

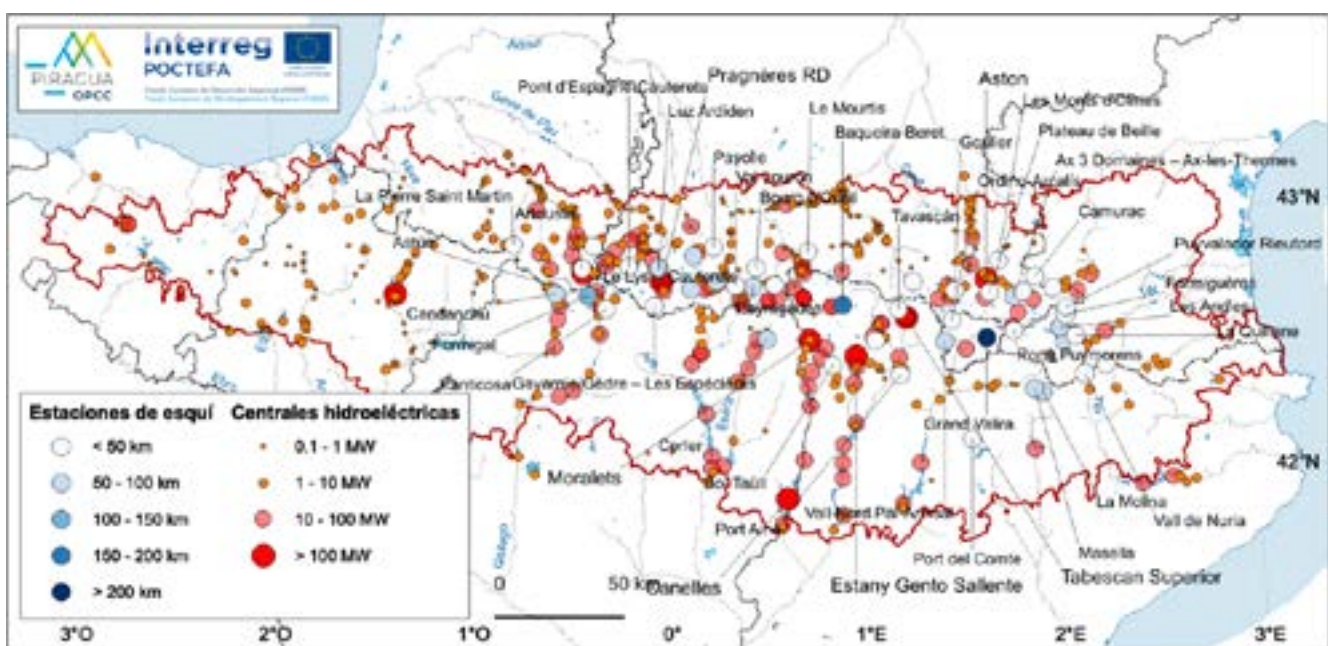


Figura 3.2. Localización de las estaciones esquí y centrales hidroeléctricas de los Pirineos, clasificadas en función del dominio esquiable (km) y la potencia instalada (MW), respectivamente.

(Fuente: Beguería, 2023.)

3.2. Retos del cambio climático y el cambio global con respecto a la competencia por los usos del agua, y opciones de adaptación

El concepto de cambio global hace referencia al conjunto de cambios y transformaciones a gran escala producto de las actividades antropogénicas y que afectan a nuestro planeta. A lo largo del último siglo, los componentes biofísicos (atmósfera, océanos, recursos hídricos, suelos, biodiversidad, entre otros) se han visto alterados como consecuencia de la intensificación de las actividades antrópicas. El aumento de los GEI se ha traducido en la modificación de los patrones climáticos, que coinciden en apuntar para los próximos años en los Pirineos una intensificación del calentamiento global (Amblar-Francés et al., 2020).

El marco socioeconómico ha cambiado mucho en las últimas décadas (aumento poblacional, en la demanda de energía, en infraestructuras, etc.) traduciéndose en un incremento de la presión sobre los recursos naturales, y en este caso sobre el agua. Esta tendencia en la presión sobre el agua se prevé que aumente. Los estudios apuntan a un aumento de población en algunas zonas de montaña así como un aumento del turismo de verano en estas zonas (Recaño, 2021), (Debarbieux et al., 2014). También se prevé un incremento del aprovechamiento hidroeléctrico debido al desarrollo de las diferentes estrategias relativas a la transición energética implementada en ambos lados del Pirineo. En este contexto, el recurso hídrico y su aprovechamiento debe ser compatible con el mantenimiento de las funciones ecosistémicas y permitir sostener los usos del agua con el menor de los conflictos.

El Gobierno de Andorra ya desde hace unos años ha desplegado varias estrategias y legislaciones en materia de adaptación al cambio climático. A continuación, se citan las más destacadas:

- Adhesión al Convenio Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) para la implementación de los procesos relacionados con la lucha contra el cambio climático.
- Proceso de Adaptación de Andorra al Cambio Climático (PAACC) (Govern d'Andorra, 2014), para dotar al país de recursos y medidas de adaptación para convertirse en menos vulnerable

a los impactos derivados del cambio climático.

- Estrategia Nacional de la Biodiversidad de Andorra (ENBA) (Govern d'Andorra, 2016), para asegurar una acción que frene la crisis de biodiversidad en el contexto de cambio climático.
- Ley de Impulso a la Transición Energética y del Cambio Climático (LITECC) (Govern d'Andorra, 2018b), potencia y acompaña la transición hacia un nuevo modelo energético basado en el uso de energías renovables y de energía baja en Emisiones de Carbono.
- Estrategia energética nacional y de lucha contra el cambio climático (OECC) (OECC, 2021) reducir las emisiones nacionales y adaptarse a los efectos del cambio climático, de acuerdo con los objetivos del acuerdo de París del Convenio marco de Naciones Unidas sobre el cambio climático (CMNUCC).
- POCTEFA ADAPYR (ADAPYR-OPCC, 2022), que tiene como objetivo sistematizar los seguimientos de impacto climático en los Pirineos y definir una Estrategia conjunta Pirenaica de Adaptación al cambio climático.

3.3. El ejemplo del Principado de Andorra

Actualmente, los usos consuntivos del agua en Andorra son de aproximadamente 21,63 hm³ al año, y se han clasificado en doméstico, turístico, agrícola, producción de nieve y ganadero (Figura 3.3). Los usos no consuntivos, por otro lado, son de unos 75 hm³ al año, y se refieren mayoritariamente a la producción hidroeléctrica.

Entre los usos consuntivos, el destinado al sector doméstico es el predominante en Andorra (72,29%). Tal como se observa en la Figura 3.3, este es prácticamente constante a lo largo del año. El uso destinado a alojamientos turísticos y al centro termal Caldea representa el 11,48% del total de uso hídrico de los sectores económicos del país y es superior en los meses de invierno y verano. Por el contrario, el consumo para uso agrícola se ciñe a los meses donde acontece el desarrollo vegetativo efectivo en los valles pirenaicos (de junio a setiembre), ocupando el tercer lugar en uso de agua (9,31%). El consumo de agua en las estaciones de esquí se concentra en los meses invernales, teniendo en cuenta que generalmente los meses de noviembre y diciembre se forma la base de nieve artificial y entre enero y marzo se aporta un refuerzo que permite completar la temporada. Este representa el 6,67% del uso total de agua del país. El uso de agua destinado a la gestión ganadera es bajo en Andorra (0,22%), debido a una actividad más extensiva que intensiva del ganado, excluyendo explotaciones que solicitan alta demanda de agua de forma concentrada en el territorio.

La reciente legislación andorrana y sus estrategias asociadas prevén un aumento de infraestructuras destinadas a la producción hidroeléctrica en el futuro. La evaluación de los cambios futuros en la disponibilidad del recurso se presenta clave para dar apoyo a la gestión hídrica y energética integral en el Principado.

El uso con mayor demanda de agua en Andorra es el hidroeléctrico que, aunque sea considerado como no consuntivo, supone de media anual un aprovechamiento de 75 hm³, principalmente procedente del río Valira d'Orient. Este aprovechamiento se traduce en una producción eléctrica media anual aproximada de 85 GWh gracias a la central hidroeléctrica de Encamp y

a una pequeña aportación de la minicentral de Arcalís. Actualmente, la hidroeléctrica aporta el 75% de la producción eléctrica nacional que, a su vez, representa el 20% de la electricidad usada en Andorra.

La reciente Ley de Impulso de la Transición Energética y del Cambio Climático (LITECC) (BOPA, 2018) expresa la voluntad de aumentar la producción eléctrica nacional como mínimo hasta el 50% en el año 2050 asegurando un porcentaje de fuentes renovables no inferior al 75%. Este compromiso exige promover la introducción de nuevas instalaciones de producción eléctrica renovable, siendo identificada la tecnología hidroeléctrica como la de mayor potencial en el Plan Sectorial de Infraestructuras Energéticas de Andorra (PSIEA) (Govern d'Andorra, 2018a). En este contexto, prever posibles cambios futuros en la disponibilidad del recurso se presenta clave para la gestión hídrica y energética.

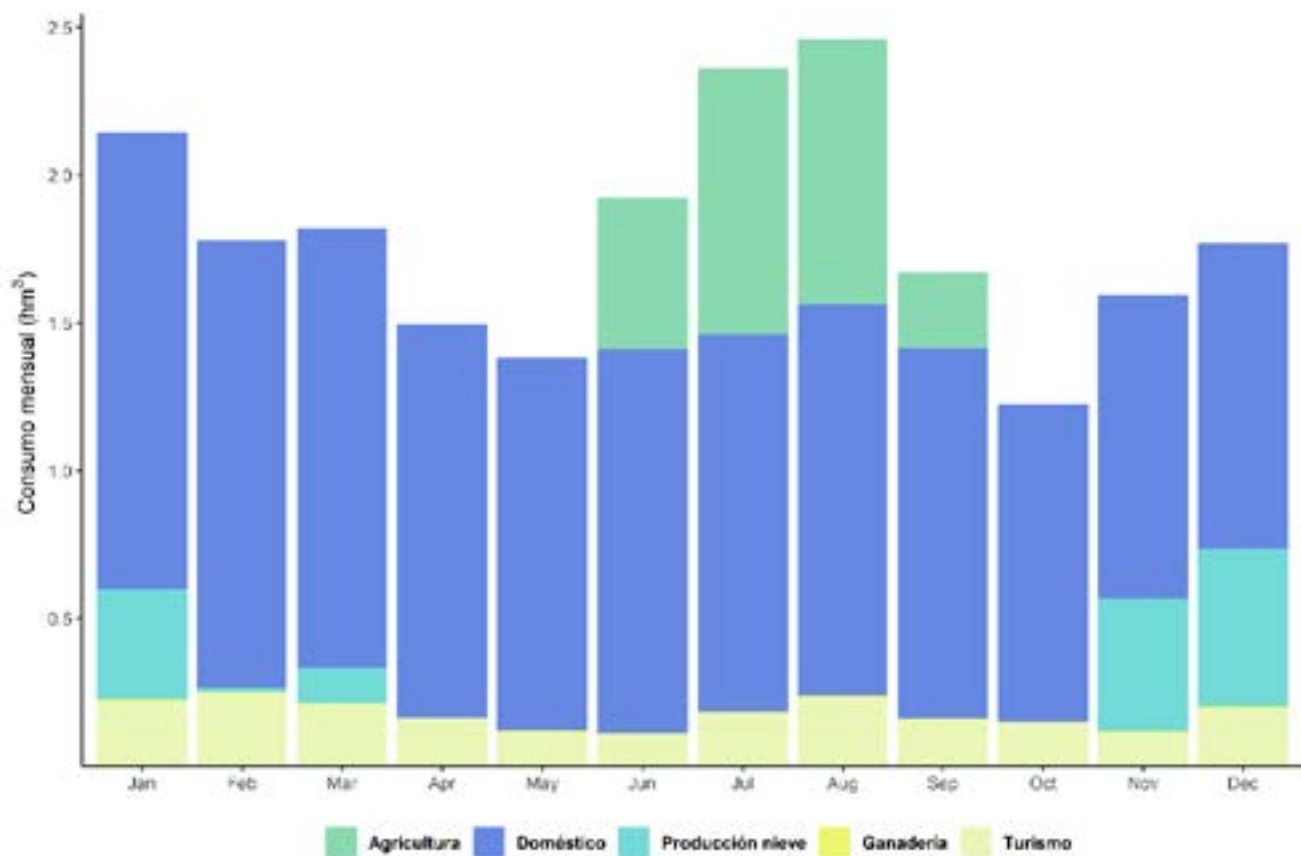


Figura 3.3. Demanda mensual de agua en Andorra en los principales sectores de actividad.

(Fuente: elaboración propia.)

Box 3.1: Análisis de vulnerabilidad basado en escenarios

El análisis de vulnerabilidad se ha basado en la herramienta WEAP (Water Evaluation and Planning System) para explorar la evolución futura de los recursos hídricos combinando escenarios climáticos y socioeconómicos. Se han utilizado datos de precipitación, temperatura y usos del suelo, humedad relativa y velocidad del viento. Se ha utilizado el año 2015 como año base del modelo, siendo la media de la serie de datos utilizada la comprendida en el periodo 2015-2019. El modelo se ha calibrado con las variables relativas a las características del suelo (permeabilidad, dirección del flujo, capacidad de retención de agua, etc.). El período de calibración es 2015-2017 y el de validación 2018-2019, demostrando que ambos superan los indicadores de bondad de ajuste, designando el modelo como satisfactorio (Moriassi et al., 2007). El modelo calibrado ha permitido simular escenarios a escala mensual hasta el año 2050. La demanda de agua se analiza y clasifica por sectores (doméstico, turístico, agrícola, estaciones de esquí, y ganadero), incluyendo las pérdidas y la distribución del consumo a escala mensual.

Se consideraron los siguientes escenarios: Referencia o statu quo, Cambio climático, Cambio global y Adaptación, este último incorporando estrategias para afrontar el cambio global. A continuación, se describen los escenarios analizados.

Tabla 3.2. Temperaturas y precipitaciones mensuales proyectadas en el escenario RCP 4.5, calculadas a partir de 6 escenarios del proyecto CLIMPY-OPCC (Amblar-Francés et al., 2020; S. Beguería, com. pers.)

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
T°C	1,36	0,92	1,21	1,08	1,37	2,18	1,92	2,33	1,50	1,44	1,03	1,14
PP(mm)	1,01	1,50	3,39	-4,75	-3,62	3,05	-1,90	6,10	-3,34	2,24	-2,82	-5,16

Escenario de referencia. Se asume el escenario de concentración de Gases de Efecto Invernadero (GEI) RCP 4.5, traducido para Andorra en un aumento de la temperatura media anual de 1,46°C en el año 2050 y con una disminución en la precipitación media anual de -0,35 mm (Tabla 3.2). A nivel socioeconómico, se proyecta un aumento de población moderado del 1,18%/año (Recaño, 2021, escenario central), porcentaje asumido también como incremento de alojamientos turísticos. La ocupación turística se considera invariable, tanto en su distribución mensual como en el promedio anual, con un valor del 51%, basado en los últimos 10 años (Unió Hotelera d'Andorra, comunicación personal).

Tabla 3.3. Temperaturas y precipitaciones mensuales proyectadas en el escenario RCP 8.5, calculadas a partir de 6 escenarios del CLIMPY (Amblar-Francés et al., 2020) para el PIRAGUA (S. Beguería, com. pers.)

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
T°C	1,66	1,61	1,66	2,05	2,09	3,32	2,96	2,83	2,50	2,11	2,03	1,95
PP(mm)	-5,62	7,35	3,74	-1,13	-1,89	0,41	3,11	14,55	4,38	1,75	-12,10	-5,80

Escenario Cambio climático. Se asume el escenario de concentración de GEI RCP 8.5, traducido para Andorra en un aumento de la temperatura media anual de 2,23°C y un aumento de la precipitación media anual del 0,72 mm en el año 2050 (Tabla 3.3). El aumento de temperatura (>2°C) se traduce en un aumento de evapotranspiración del 10%, que afecta a las necesidades de riego en la agricultura (Durán & Salamanca, 2008).

En la misma línea, se ha considerado un aumento del consumo de agua para producción de nieve en las estaciones de esquí del 15% (Gerbaux et al., 2020). El resto de los atributos socioeconómicos se heredan del escenario de referencia.

Escenario Cambio global. Se consideran las mismas condiciones que en el escenario Cambio climático con variaciones en algunas variables socioeconómicas: a) incremento de la población del 1,82%/año (Recaño, 2021); b) aumento de los alojamientos turísticos del 1,82%/año; y c) aumento de la ocupación turística anual hasta el 70% para el año 2050.

Escenario Adaptación. Se consideran todos los condicionantes del escenario Cambio global, más un paquete de medidas de adaptación. A continuación, se detallan y justifican las estrategias de adaptación evaluadas, destinadas a reducir el uso del agua de los principales sectores consumidores del país.

- Sector doméstico

Disminución del consumo medio por persona que pasaría de los 220 l/persona y día actuales, a los 150 l/persona y día (objetivo definido en Govern d'Andorra, 2021b) a un horizonte 2035). Esta reducción se podría conseguir a través de: i) la elaboración de un Plan de divulgación del uso responsable del agua en Andorra, que incluiría la difusión a la población de un manual de buenas prácticas de ahorro doméstico del agua; y ii) la creación de la “cuota del agua”, la cual se pagaría proporcionalmente por consumo unifamiliar como referencia simbólica de concienciación ambiental.

Reducción del 20% de pérdidas en las captaciones y transporte de agua. Se asume una inversión pública en la mejora de las canalizaciones de captación y transporte de agua, y una mejora en el monitoreo y seguimiento de dichas captaciones. Se estima que estas medidas reducirían un 50% las pérdidas actuales de agua que se estiman en un 40% (Govern d'Andorra, 2021a).

- Sector turístico

Mejora de la eficiencia en el uso de agua que permite reducir un 25% el consumo en los alojamientos turísticos. Esta mejora se podría conseguir siguiendo las directrices del proyecto LIFE Watsavereuse, y en concreto a través de la creación y difusión de un manual de uso eficiente de agua en el sector turístico y de la implementación de una marca de garantía de buenas prácticas en el uso de agua en alojamientos turísticos de Andorra.

- Estaciones de esquí

Monitoreo del uso de agua para conocer en detalle los principales ámbitos consumidores en una estación de esquí y los potenciales ahorros.

Seguimiento continuo del espesor del manto nival para mejorar la planificación y gestión de la nieve. El espesor del manto se puede obtener mediante la instalación de equipos GNSS-RTK (Global Navigation Satellite Systems) RTK (Real-time Kinematic) en las máquinas pisanieves y la integración de la tecnología LiDAR (Light Detecting And Ranging) en vehículos aéreos no tripulados (drones) (Pons et al., 2018).

El incremento de la eficiencia en el uso de recursos hídricos destinados a la producción de nieve mediante las estrategias descritas, se estima que puede suponer una reducción de hasta el 15% en la demanda de agua dedicada a este fin (Cognard y François, 2019).

Durante el proyecto PIRAGUA, ambas estrategias se han implementado en dos pruebas piloto en las estaciones de Grandvalira y Vallnord con el objetivo de evaluar su viabilidad técnica y económica. Como resultado se ha desarrollado una plataforma destinada a los gestores de las estaciones para ser utilizada como centro de control. Esta permite acceder a las medidas de espesor realizadas por las distintas máquinas pisanieves en tiempo real, así como consultar el histórico de la temporada.

- Sector agrícola

Reducción del 15% de la demanda de agua para riego mediante la tecnificación del riego. En concreto a la implantación de sistemas de riego más eficientes (VVAA FAO, 2008), evitando el riego por gravedad (también llamado riego a manta) y el riego por aspersión, e implementando el riego por goteo.

3.3.1 Efectos del cambio climático y el cambio global en el régimen hídrico

Para abordar el caso de estudio se ha desarrollado un análisis de vulnerabilidad basado en la simulación de escenarios, considerando tanto el cambio climático como los cambios socioeconómicos, así como diferentes medidas de adaptación (Box 3.1). Ello ha permitido caracterizar la situación actual en cuanto a la disponibilidad y uso de los recursos hídricos, y también disponer de simulaciones de futuro.

El régimen hidrológico de Andorra es el típico de una zona de montaña de influencia mediterránea con régimen nival, el cual presenta caudales altos en primavera y bajos en estiaje con una ligera

aportación procedente de las precipitaciones en otoño. Los resultados obtenidos de la modelización muestran que el hidrograma actual cambiará en los próximos años debido al cambio climático (Figura 3.4).

En el futuro se espera una disminución del caudal anual en Andorra, especialmente entre finales de primavera y verano.

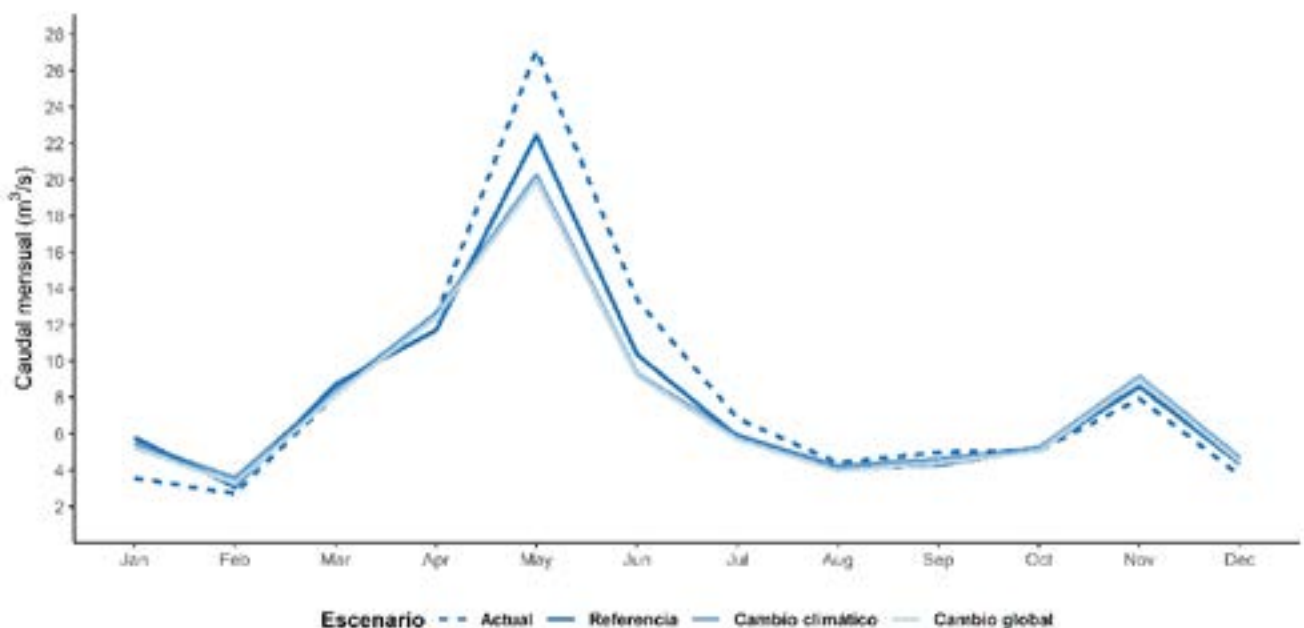


Figura 3.4. Cambio en el régimen mensual de caudal en la salida de la cuenca de Andorra (Borda Sabaté) en el año 2050 en el escenario Actual y en los escenarios Referencia, Cambio climático y Cambio global.

(Fuente: elaboración propia.)

El cambio de patrón en el hidrograma está asociado al cambio en el régimen de nevadas. La precipitación sólida decaerá debido al aumento de temperatura y, por consiguiente, la escorrentía instantánea durante los meses de invierno será significativamente mayor.

El escenario de referencia presenta una pérdida de caudal medio anual del 5,87% respecto a la actualidad, mientras que el escenario Cambio climático presenta una ligera disminución, un poco por encima del de referencia (6,80%) respecto al Actual. Las disminuciones de caudal, entre el escenario de Cambio climático y el Actual, se concentran durante los meses de abril a setiembre (-17,73%) y se prevén incrementos el resto de los meses (14,87%). Los caudales en el escenario Cambio global siguen ligeramente por debajo los del escenario Cambio climático.

Estos resultados apuntan a que el incremento de temperatura en el futuro producirá un aumento de la ratio agua / nieve, un avance del deshielo y, en definitiva, un aumento de la escorrentía superficial en los meses de invierno. Durante estos meses aumentará el caudal en detrimento del caudal a finales de primavera y verano, donde será significativamente menor. Estos resultados son acordes con los proporcionados por estudios en cuencas de régimen nival (Birsan et al., 2005; Lorenzo-Lacruz et al., 2012; Wilson et al., 2010).

Es importante resaltar que la modelización presentada se basa en modelos climáticos con incrementos aditivos en los valores de temperatura y precipitación, en este caso basados en el proyecto CLIMPY (Amblar-Francés et al., 2020). Por tanto, no se han tenido en cuenta el aumento de eventos climáticos extremos como la sequía, que podrían agravar los caudales bajos en épocas estivales.

3.3.2 Afectaciones del cambio climático y el cambio global a las funciones ecosistémicas

La planificación y la gestión de las cuencas hidrológicas debe incorporar los escenarios futuros de cambio climático y las medidas

adaptativas. Uno de los objetivos clave es el de hacer compatible los diferentes usos del agua y plantear el aumento de las infraestructuras de producción hidroeléctrica asegurando el mantenimiento de la calidad ecológica del río, y a ser posible, promover una tendencia de la mejora en el tiempo.

El mantenimiento de la calidad ecológica de los ríos es una de las garantías de desarrollo sostenible de cualquier país. En este sentido, uno de los instrumentos previstos por la Directiva Marco del Agua 2000/60/CE son los programas de seguimiento y control del estado de los ríos y de la estructura y funcionamiento de los ecosistemas acuáticos. La mayoría de los países controlan la calidad de los ríos a través de la implantación de caudales ambientales.

En este sentido, en Andorra existe el Reglamento de Protección de los Hábitats Acuáticos (en adelante, RPHA) (BOPA, 2005) que regula los caudales mínimos i define el caudal ambiental. El RPHA considera que el caudal mínimo ecológico es la décima parte del caudal medio interanual, mientras que considera el caudal ecológico como “el caudal necesario para garantizar la evolución biológica natural de las poblaciones de flora y fauna acuáticas”, no obstante, no se detalla su cálculo o sus valores.

Se tendrá que valorar el desarrollo de un régimen de caudales ambientales que aseguren las funciones ecosistémicas de los ríos en el 2050.

En los ríos de Andorra, así como en el resto de ríos de cabecera de los Pirineos, un régimen de caudales por debajo del límite ambientalmente aceptable supone la pérdida de las funciones ecosistémicas (Arnett, 1976; Agencia Catalana de l'Aigua, 2006). En este contexto, se esperan retrocesos o pérdidas de especies autóctonas.

Este podría ser el caso de la trucha común (*Salmo trutta*), que necesita como mínimo una profundidad de río de 40 cm para mantener la población adulta de forma estable en el tiempo (Lewis, 2006). Con caudales por debajo del límite ambiental también se espera una pérdida en la calidad del agua, pudiendo en determinados periodos, quedarse estancada, aumentando su temperatura, su concentración en nitritos y

nitratos, y disminuyendo la concentración en oxígeno, afectando a numerosas especies de fauna y flora, y a la calidad propia del agua. Este caso se ve agravado cuando los caudales bajos suceden en verano ya que las temperaturas ambientales son más elevadas. Existen muchos otros efectos y ejemplos de la pérdida de las funciones ecosistémicas en este tipo de ríos (pérdida de la calidad de agua para uso humano, pérdida de resiliencia del ecosistema, etc.) (Tennant, 1976; Agencia Catalana de l'Aigua, 2006).

Los caudales mínimos definidos en el RPHA (10% del caudal interanual) no aseguran las funciones ecosistémicas de los ríos (Arnett, 1976; Tennant, 1976; Diaz et al., 2003; Alcázar Montero, 2007; Velychko y Dupliak, 2021). Por tanto, es necesario definir y aplicar unos caudales ambientales específicos más conservadores, por tramos de río, que incluyan estudios y seguimientos ambientales debidamente validados, y representen la variabilidad natural del río.

Debido a que la disponibilidad de datos ambientales y biológicos no es evidente, ni tampoco el número y la representatividad de estaciones de aforo con series significativas de datos, generalmente se recurre a cálculos hidrológicos como los percentiles. Un ejemplo son los propuestos en el PSIEA (Govern d'Andorra, 2018a), basados en el método de Tennant (Tennant, 1976). Otro método hidrológico más robusto, extendido y representativo, es el método basado en el cálculo de las medias de los mínimos de las medias móviles, denominado QBM o Basic Flow Method (Arnett, 1976; Agencia Catalana de l'Aigua, 2006; Alcázar Montero, 2007; Palau y Alcázar, 2012), con adaptaciones a la variabilidad estacional propia de cada río.

A falta de caudales ambientales más robustos, en este informe se ha valorado el cumplimiento de los caudales ambientales fijados en el PSIEA, que propone los siguientes porcentajes estacionales de retención de caudal:

- 20% del caudal medio interanual (de octubre a marzo)
- 40% del caudal medio interanual (de abril a septiembre)

En el siguiente apartado se valora la consecución de los caudales ambientales, observando que en el

futuro se agravará su incumplimiento en los meses de verano.

3.3.3 Afectaciones del cambio climático y el cambio global al sector hidroeléctrico

Los escenarios de cambio climático estudiados en Andorra prevén una modificación en la capacidad de producción hidroeléctrica, con algunos meses al alza y otros a la baja.

Las centrales hidroeléctricas se prevén esenciales para acompañar la transición energética. En el caso de Andorra, la principal central hidroeléctrica se sitúa en Encamp y supone alrededor del 15% de la producción nacional de energía (OECC, 2021). Se basa en un sistema de lagos de alta montaña regulados y de canales que transportan el agua hacia el lago de Engolasters. Adicionalmente, existen dos minicentrales de agua fluyente (Arcalís y Aixovall) y el PSIEA proyecta cuatro más a implementar antes del año 2030. En este sentido, el estudio de las afectaciones del cambio climático en la producción hidroeléctrica, en el caudal y en las funciones ecosistémicas de los ríos se presenta clave para desplegar las estrategias de adaptación más adecuadas.

Revisar la estrategia de gestión y regulación de agua de los lagos regulados de Andorra será crucial para adaptarse al nuevo escenario de cambio climático.

En este caso de estudio se ha observado que el régimen de caudales se verá modificado por el aumento de la precipitación líquida en invierno y por el adelanto de la fusión de la nieve.

Esta situación ha sido ya descrita en distintos estudios realizados a escala de los Pirineos y los Alpes (OPCC-CTP, 2018; Brunner et al., 2019).

Los escenarios de cambio climático estudiados en Andorra prevén una modificación en la capacidad de producción hidroeléctrica. La 5 presenta la producción eléctrica mensual estimada en la central de Encamp el año 2050 en

los distintos escenarios analizados.

El escenario Referencia prevé un incremento de la producción media de energía hidroeléctrica anual del 2% para el año 2050, mientras que el aumento en el escenario Cambio global es algo más acentuado (2,4%). La diferencia positiva entre el escenario Cambio global y la actualidad es especialmente significativa en los meses de enero, febrero y marzo (40,9%). Tal como se observa en la Figura 3.5, este incremento es consecuencia de la mayor disponibilidad de recurso durante los meses de invierno (Adamovic y Després, 2020). En cambio, existe un periodo donde los caudales se prevé que disminuirán afectando también a la producción hidroeléctrica. La menor disponibilidad de caudal no llegaría a penalizar la producción en mayo ya que este es un periodo en el que no se aprovecha la totalidad del recurso disponible debido a los caudales significativamente elevados de este periodo y la baja capacidad de almacenaje de agua de Andorra (lago-embalse de Engolasters). Por contra, la reducción de caudal a principios de verano penaliza la producción, en especial durante los meses de junio y julio, y con mayor intensidad en el escenario Cambio global (-25,86%).

Aunque la importante disminución de caudal en primavera no tiene gran influencia en la capacidad de producción, la disponibilidad de agua en este periodo para reservar en los lagos de alta montaña va a ser inferior y, por tanto, la gestión del almacenaje de agua se verá alterada. En este sentido, la capacidad de regulación de los almacenajes de agua en zonas de montaña será clave para gestionar la producción hidroeléctrica y hacerla compatible con la conservación de los caudales ambientales. Esto dependerá de cada región y de su capacidad de almacenaje, que en el caso de Andorra es baja.

Los resultados expuestos en esta sección están en línea con los obtenidos en países del centro i norte de Europa (Adamovic y Després, 2020). Es importante destacar que estos se basan en la proyección de un año tipo y, por tanto, el impacto sobre la producción hidroeléctrica del posible incremento de periodos de sequía (van Vliet et al., 2016a) queda fuera del alcance del presente estudio.

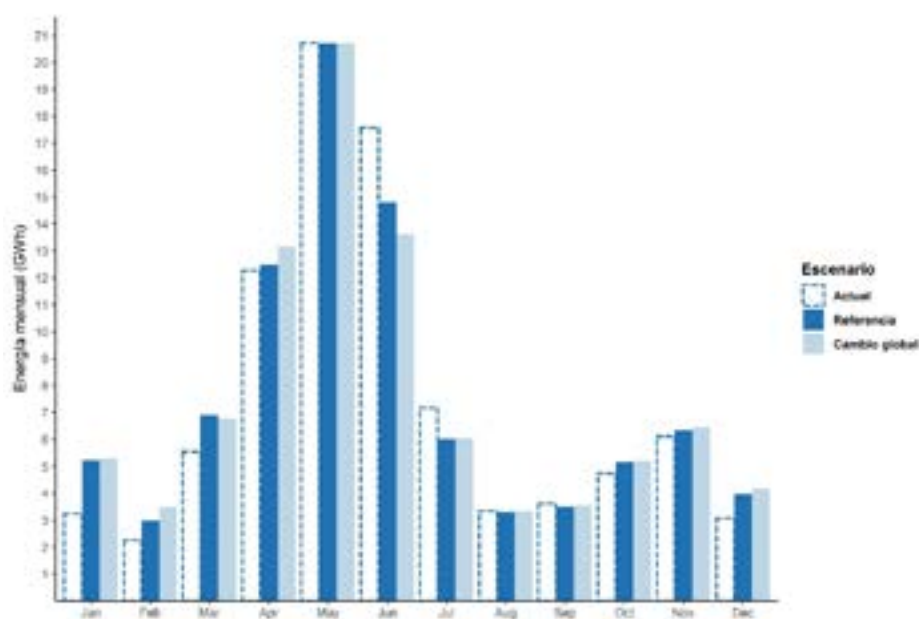


Figura 3.5. Energía eléctrica producida en la central hidroeléctrica de Encamp en los escenarios Actual, Referencia y Cambio global en el año 2050.

(Fuente: elaboración propia.)

3.3.4 Afectaciones del cambio climático y el cambio global en un tramo de río con alta competencia por el agua

Se ha analizado uno de los tramos que podría presentar conflictos en el uso del agua debido a una alta convergencia de usos de distintos sectores. Se trata del tramo entre la presa de Ransol y la confluencia del río Valira d'Orient y el torrente de Plamanera (Figura 3.6), justo antes del retorno de agua de la central hidroeléctrica al río (coordenadas Lambert III Sud-Andorra 536028; 24948).

Este tramo, de unos 11,5 km de longitud, se ve afectado por las tres desviaciones de agua de la central hidroeléctrica de Encamp hacia Engolasters. Además, en el mismo tramo existen dos poblaciones con un importante consumo de agua (Canillo y Encamp), usos turísticos y agrícolas y, aguas arriba, las captaciones destinadas a la producción de nieve de la estación de esquí de Grandvalira.

Según la modelización realizada, a excepción del mes de febrero, se cumplen los caudales mínimos ambientales fijados en el RPHA (10% del caudal interanual) en el nodo previo al retorno de agua de la hidroeléctrica. Por el contrario, los caudales ambientales fijados por el PSIEA no se cumplen durante la mayor parte del año.

Los resultados de los escenarios futuros apuntan a una reducción general del caudal anual en el horizonte 2050. En este sentido, la disminución del caudal se concentra entre los meses de abril y agosto, mientras que de enero a febrero y de octubre a diciembre se prevé un ligero aumento (Figura 3.7).

El incremento de caudal previsto en invierno permite acercarse al caudal ambiental fijado en el PSIEA durante esta estación, sin llegar a conseguirlo. El descenso del caudal anual en el escenario de referencia es del 9,57% respecto a la actualidad. El descenso de caudal en el escenario Cambio global es de 2,9 m³/s, representando una reducción del 15,26% respecto a la actualidad, mientras que en el Cambio climático es de 2,18 m³/s (-11,46%).

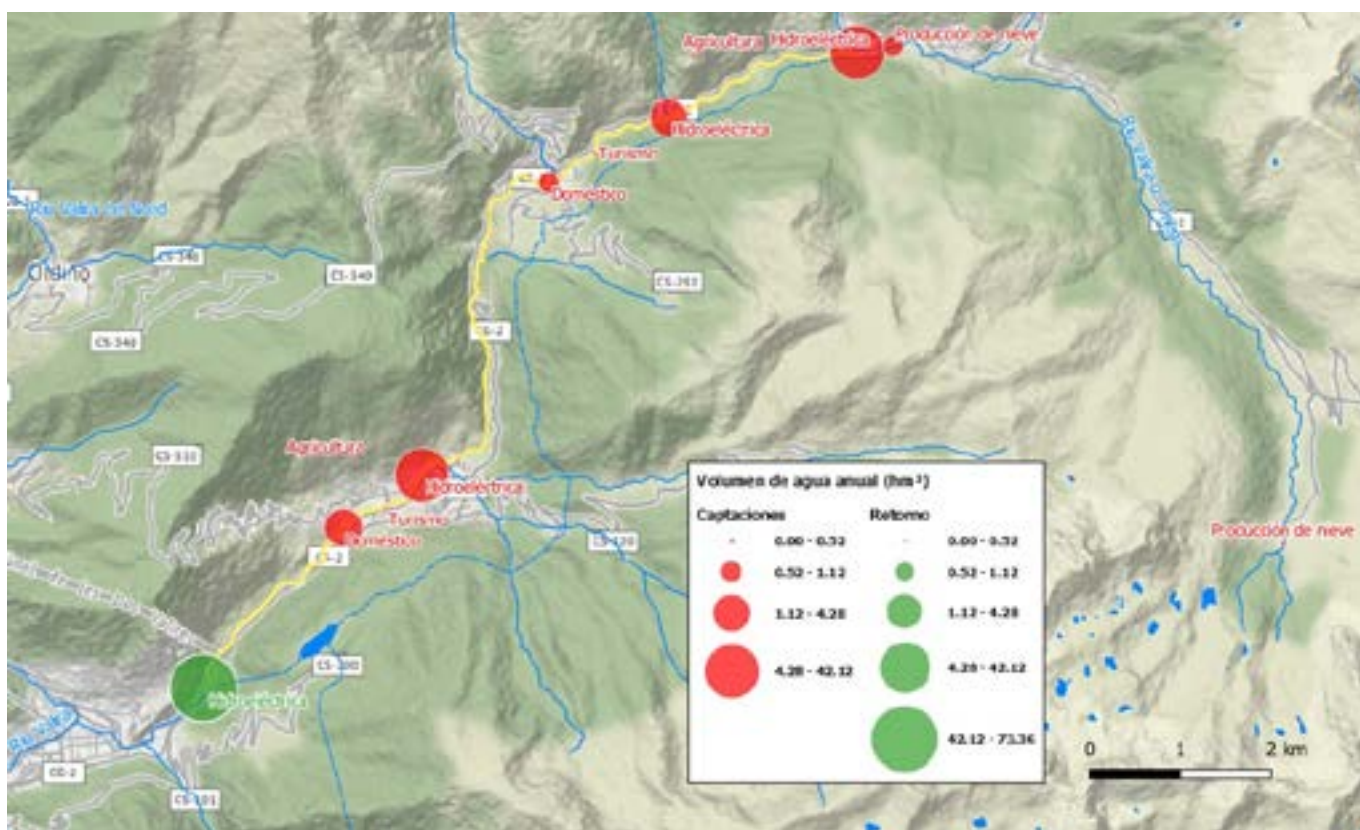


Figura 3.6. Localización del tramo de río con alta competencia por el agua, entre Ransol y Escaldes-Engordany.

(Fuente: elaboración propia.)

Tal como se observa en la figura, en el escenario Cambio climático, el periodo de abril a agosto es el que presenta una disminución de recurso más acentuada (29,53% respecto a la actualidad). La disminución durante los meses más cálidos del año es más crítica ya que la temperatura del agua de los ríos en el periodo veraniego es más elevada, agravando las condiciones bioquímicas y térmicas de las aguas de caudal bajo y afectando directamente al hábitat y a sus seres vivos.

En junio, el caudal actual modelizado es de 1,62 m³/s mientras que en el escenario Cambio global disminuye hasta 0,74 m³/s (reducción del 54%), ambos por debajo del límite del caudal ambiental fijado en el PSIEA (1,85 m³/s). Según los resultados de la modelización, actualmente entre los meses de junio y octubre no se cumple el caudal ambiental fijado en el PSIEA.

Precisamente en estos meses, todos los escenarios futuros pronostican que los valores de caudal aún se alejarán más de los establecidos por el PSIEA como caudal ambiental. En cambio, durante los meses de invierno, el incremento previsto de caudal en el horizonte 2050 facilitará el cumplimiento de los valores propuestos por el PSIEA. Febrero es el mes que presenta menor caudal en todos los escenarios, periodo en que el caudal representa menos de la mitad del requerido por el criterio ambiental fijado en el PSIEA.

Es necesario desplegar una estrategia integral de adaptación al cambio climático para hacer compatible la conservación de las funciones ecosistémicas de los ríos y la transición energética.

Es importante remarcar que hasta la fecha no se ha estudiado ni determinado para Andorra ningún régimen de caudales ambientales específicos para sus ríos teniendo en cuenta estudios precedentes, datos de seguimiento ambiental y cálculos hidrológicos robustos como el cálculo de las medias de los mínimos de las medias móviles o QBM (Arnett, 1976; ACA, 2006; Alcázar Montero, 2007). Esta propuesta de caudales ambientales permitiría zonificar por tramos los ríos de Andorra teniendo en cuenta sus particularidades.

Estas perspectivas futuras de disminución de caudal (sin tener en cuenta las sequías), y en especial en tramos de alta competencia por el agua como el descrito, refuerzan la necesidad de estudiar, valorar y desplegar una estrategia integral de adaptación al cambio climático que compatibilice la conservación de las funciones ecosistémicas de los ríos y la transición energética a la que se ha comprometido el país. Esta estrategia debería regular los caudales ambientales, integrando la conservación de los sistemas riparios y por consiguiente de sus funciones ecosistémicas.

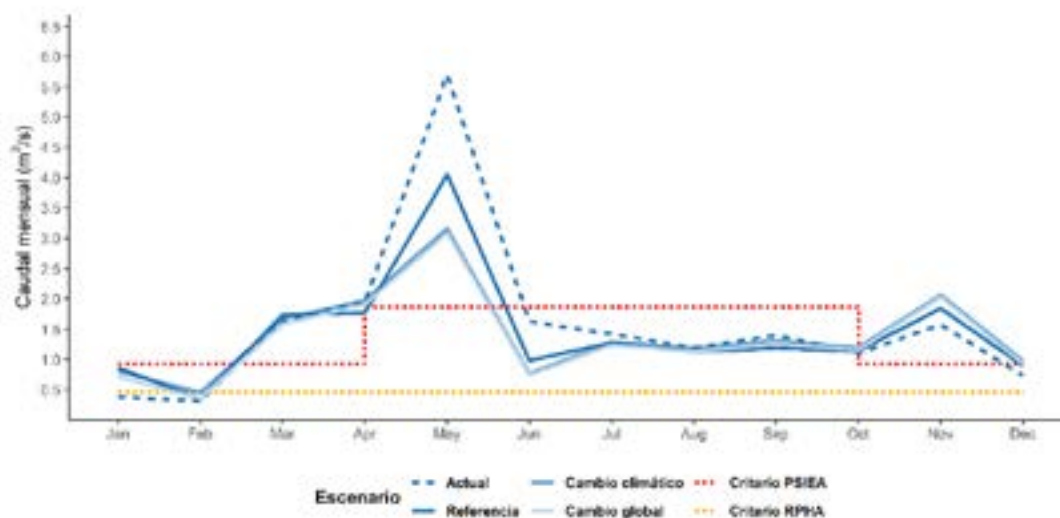


Figura 3.7. Caudal mensual en el año 2050 del tramo de río con alta competencia por el agua, entre Ransol i Escaldes-Engordany (coordenadas Lambert III Sud-Andorra 536028;24948) y en los diferentes escenarios analizados. En rojo se proyecta el límite de caudal ambiental propuesto por el PSIEA, y en amarillo el caudal mínimo ecológico reglamentario del RPHA.

(Fuente: elaboración propia.)

A su vez, la regulación de los caudales ambientales permitiría disponer de unos criterios robustos a aplicar en el desarrollo de nuevas instalaciones de aprovechamiento hidroeléctrico.

3.3.5 Capacidad de adaptación

La demanda anual en Andorra en la actualidad es de 21,63 hm³, mientras que en el escenario Cambio global se prevé un incremento hasta los 36,49 hm³ (un 68,70%) en el horizonte 2050. Tal como se observa en la Figura 3.8, la distribución mensual de la demanda de agua se mantiene muy similar en todos los escenarios, siendo julio, agosto y enero los meses de mayor demanda y octubre el de menor.

En un contexto de cambio global, el sector doméstico es el que dispone de un mayor potencial de ahorro de agua, con un 22,84% de potencial de ahorro respecto al total de usos consuntivos.

La distribución de la demanda mensual en los principales sectores (Figura 3.9) muestra

complementariedad entre el sector agrícola y la producción de nieve, donde el primero centraliza la demanda de agua en los meses de primavera y verano mientras que la innivación artificial la concentra en invierno.

Los sectores doméstico y turístico se mantienen generalmente constantes durante el año, apreciándose una pequeña disminución del uso del agua en el sector turístico en primavera y otoño. La implementación de las medidas adaptativas propuestas en el escenario Adaptación reducen la demanda de agua para uso consuntivo un 27,87% respecto el escenario Cambio global (Tabla 3.2).

El análisis de la demanda sectorial muestra que el volumen de agua en la actualidad para uso doméstico es de 15,43 hm³, mientras que en el escenario Cambio global asciende a 27,08 hm³ (un incremento del 72,7%). Las medidas adaptativas estudiadas disminuirían la demanda hasta los 18,76 hm³, reduciéndose un 30% respecto al escenario Cambio global y llegando a valores cercanos a los actuales.

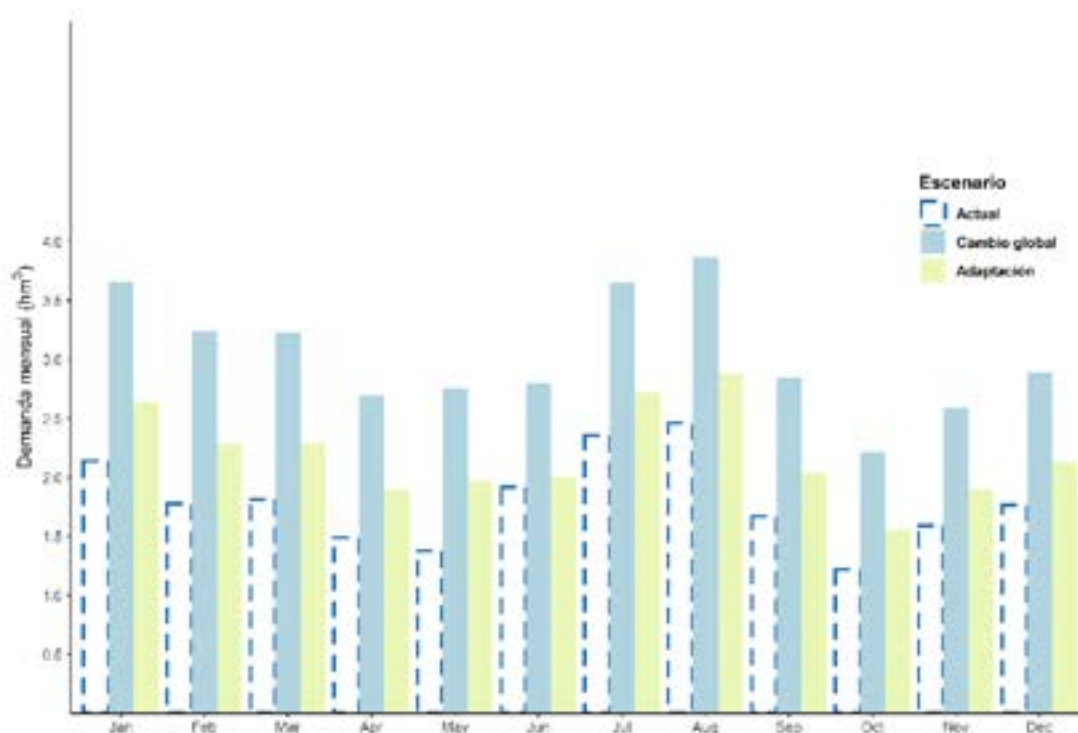


Figura 3.8. Demanda de agua mensual en la actualidad y los escenarios Cambio global y Adaptación en el año 2050.

(Fuente: elaboración propia.)

La demanda actual de agua para la agricultura es de 2,57 hm³, mientras que en el escenario Cambio global se espera que aumente hasta los 2,85 hm³. Con las medidas adaptativas implantadas, la demanda del sector disminuiría un 15%, tal y como se ha establecido en la definición de los escenarios (Box 3.1).

El escenario Cambio global prevé que el uso de agua destinado a producción de nieve artificial en las estaciones de esquí de Andorra aumente hasta 1,76 hm³, un incremento del 15% respecto la actualidad que se conseguiría compensar con las medidas adaptativas propuestas.

Actualmente, la demanda de agua para abastecer los alojamientos turísticos y la infraestructura de SPA Caldea es de 2,08 hm³ al año, mientras que en el escenario Cambio global se espera un aumento hasta los 4,72 hm³.

Con las medidas adaptativas implantadas la demanda se podría reducir hasta los 3,59 hm³. Los meses de mayor demanda se mantienen en febrero y agosto, siendo este último especialmente crítico en lo que a caudal se refiere en un contexto de cambio global.

La Tabla 3.4 presenta el potencial de ahorro de agua de cada sector estudiado, mostrando que el sector doméstico es el que dispone de un mayor potencial, con un 22,84% de potencial de ahorro respecto el total de usos consuntivos en el escenario Cambio global. En el otro extremo se encuentran las estaciones de esquí que con un potencial de ahorro a escala de país a través de medidas de eficiencia del 0,74%. A pesar del potencial limitado a escala de país, es importante remarcar que la mayor parte de captaciones de las estaciones de esquí se encuentran en la cabecera de los ríos donde los caudales son especialmente bajos en determinadas épocas del año.

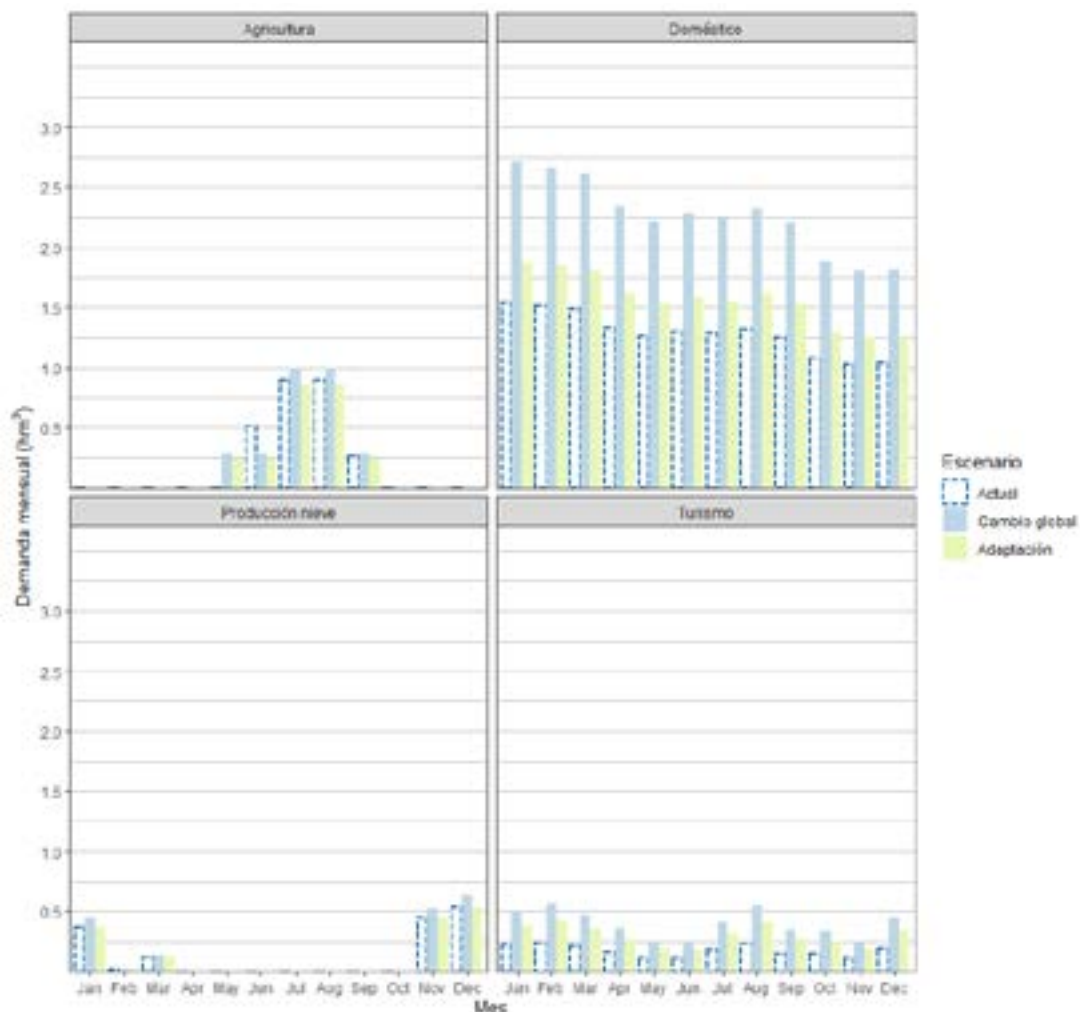


Figura 3.9. Demanda de agua mensual (hm³) para usos doméstico, turístico, producción de nieve y agricultura en los escenarios considerados para el año 2050.

(Fuente: elaboración propia.)

Las captaciones anuales destinadas a uso consuntivo en Andorra suponen un 0,54% del caudal disponible. Añadiendo las captaciones de uso no consuntivo (en especial para uso hidroeléctrico) el volumen de agua asciende a un 23,71% del caudal. Las medidas adaptativas permitirían reducir el 27,87% del uso consuntivo del agua, aun así, sin suponer una mejora significativa en la conservación del caudal destinado a mantener las funciones ecosistémicas. En este sentido, deberán considerarse medidas de adaptación al cambio climático más enfocadas a la transformación socioeconómica y a las estrategias políticas que las estudiadas con el modelo implementado, que se centran en el incremento de la eficiencia del uso de recursos.

Según los resultados obtenidos, en el año 2050 y en el escenario más extremo (Cambio global), los usos domésticos, turísticos, agrícolas e hidroeléctricos actuales podrán ser abastecidos y, por tanto, la compatibilidad entre usos del agua de los principales sectores de actividad no se verá directamente afectada. El reto será asegurar el

mantenimiento de las funciones ecosistémicas a lo largo del año, en todos los tramos y compatibilizarlo con el incremento de producción hidroeléctrica previsto.

La regulación de los caudales ambientales como medida adaptativa se estima imprescindible especialmente en los tramos de captación de agua para uso hidroeléctrico. Esta tendrá un efecto significativo en la conservación de las funciones ecosistémicas de los tramos de río especialmente durante los meses que se espera que el hidrograma presente caudales más bajos.

Tabla 3.4. Potencial de ahorro (hm³ y %) de agua de los diferentes sectores de uso consuntivo del agua en Andorra aplicando las medidas adaptativas al escenario Cambio global

Sector	Potencial de ahorro (hm ³)	Potencial de ahorro (%)*
Doméstico	8,32	22,84
Turístico	1,13	3,1
Estaciones de esquí	0,27	0,74
Sector agrícola	0,43	1,18
TOTAL	10,15	27,87

* Ahorro respecto al total de usos consuntivos.

3.4. Conclusiones

A pesar de que los resultados y los aprendizajes aportados en este capítulo se basan en un caso de estudio centrado en el Principado de Andorra, estos pueden servir de referencia y ser generalizables a otras zonas de los Pirineos, con un contexto geográfico y socioeconómico parecido.

El patrón de cambios en la distribución del caudal a lo largo del año en el contexto de cambio global en Andorra es ya conocido y representativo de la cordillera pirenaica y de los Alpes, con un avance del deshielo y un aumento de caudal en los meses de invierno seguido de una reducción en primavera y verano.

A continuación, se resumen las principales conclusiones sectoriales basadas en los aprendizajes del caso de estudio de Andorra. El grado de aceptación social de diferentes medidas de adaptación es variable, como demuestra el estudio realizado para este caso de estudio (Box 3.2).

3.4.1 Población residente y turismo

En algunas zonas pirenaicas como Andorra, se prevé un aumento de la población residente que se sumaría al incremento del turismo previsto en verano, donde el intervalo de buenas temperaturas se extenderá en este periodo y además servirá de refugio para los visitantes (turistas) de las zonas llanas y de grandes ciudades que evitaran las canículas estivales.

Las medidas adaptativas al cambio global propuestas en base al presente caso de estudio se centran en:

- Reducir las pérdidas en la red de distribución del agua y monitorizar todas las captaciones y redes de distribución.
- Promover una gestión del agua más eficaz en los centros turísticos y dar a conocer manuales de buenas prácticas de gestión del agua tanto a usuarios como a promotores. Las mismas medidas se aplican también al

consumo doméstico de agua.

- Promover una desestacionalización del turismo centrado en el mes de agosto hacia meses de baja demanda y disponibilidad de recurso favorable.
- Desplegar tecnologías destinadas a mejorar la eficiencia en la producción y la gestión de la nieve, como el monitoreo del uso de agua y el seguimiento continuo del espesor del manto nival.
- Desarrollo de un sistema de labelling para centros turísticos en los Pirineos ligado a un uso racional y eficiente del agua, y potenciando actividades turísticas, recreativas y de salud con menor consumo de agua.

3.4.2 Agricultura

En el Pirineo axial, tomando Andorra como referencia, la demanda de agua se concentra en los meses de verano cuando existe de forma natural el período vegetativo. La agricultura y la ganadería extensiva en los Pirineos permiten mantener la biodiversidad de los espacios abiertos, regulan los incendios, producen alimentos de corto recorrido, entre otros beneficios, por lo que es interesante mantener esta actividad y adaptarla al contexto de cambio climático.

Las medidas adaptativas planteadas a aplicar en los Pirineos son:

- Tecnificación del riego (automatización y seguimiento remoto).
- Implantación de sistemas de riego más eficientes.
- Elección de especies y variedades vegetales más adaptadas a las nuevas condiciones climáticas.

3.4.3 Producción de energía hidroeléctrica

Los cambios previstos en el hidrograma en el horizonte 2050 incidirán en la disponibilidad mensual de agua destinada a producción hidroeléctrica. Las opciones de adaptación de la gestión hidroeléctrica dependerán, en gran medida, de la capacidad de acumulación y regulación de los embalses de cada región.

En el contexto de cambio global se prevé que la mayor reducción de caudal será en verano, siendo el periodo más vulnerable y en el que habrá que destinar mayores recursos para evaluar la afectación a las funciones ecosistémicas de ciertos tramos de río. La disminución del recurso en verano hace que su gestión sea un desafío en un hipotético aumento de la demanda de agua y energía en esta estación (agricultura, turismo, climatización, etc.). Cabe añadir que, en verano, las temperaturas ambientales llegan a su máximo lo que contribuye a empeorar las condiciones ecológicas del agua.

Las regiones pirenaicas con mayor capacidad de almacenamiento de agua (lagos o embalses adaptados) tendrán mayor flexibilidad para compensar la escasez de agua prevista a finales de verano y satisfacer los caudales ambientales. En este contexto, las medidas de adaptación propuestas en relación a la producción hidroeléctrica son:

- Optimizar el aprovechamiento hidráulico mediante la tecnificación de sistemas de control remoto para controlar los caudales captados y los caudales ambientales en los tramos objeto de aprovechamiento.
- Disponer de herramientas de estimación de la cobertura de nieve a gran escala para la predicción de disponibilidad de agua proveniente de la fusión.
- Evaluar la capacidad real de almacenamiento de agua en cada cuenca pirenaica y las posibilidades futuras de gestión de almacenamiento.
- Adelantar el llenado de los lagos-

embalses para asegurar un caudal ambiental apropiado río abajo en verano.

- Proponer un sistema de caudales ambientales adaptados al cambio global a nivel de cordillera pirenaica.
- Gestionar de forma conjunta el recurso hídrico y el sector energético mediante modelos de planificación integrada a escala pirenaica.

Paralelamente, la diversificación de la producción eléctrica, potenciando otras tecnologías de generación, es una medida fundamental ya que permite disminuir la presión sobre el sistema hídrico e incrementar la resiliencia del sector energético.

3.4.4 Funciones ecosistémicas

Las funciones ecosistémicas son básicas para asegurar la resiliencia del sistema hidrológico en las zonas de montaña y en especial la calidad del agua y la conservación de la biodiversidad.

Los ingredientes de los sistemas riparios y sus funciones ecosistémicas quedan expuestos a fuertes cambios ambientales en el contexto de cambio global. Los caudales ambientales son la primera medida para asegurar un mínimo de estas funciones. Se debe entender el concepto de caudales ambientales como una medida de restauración y no como una restricción a aplicar en los regímenes hidrológicos. Algunas de las medidas adaptativas a considerar en esta línea son:

- Estudiar, valorar, y desplegar un sistema de caudales ambientales que cumpla con la Directiva Marco del Agua 2000/60/CE conservando una calidad aceptable de los sistemas riparios y por consiguiente de sus funciones ecosistémicas. A su vez, el sistema propuesto debe ser compatible con el compromiso de abordar la transición energética en los Pirineos.
- Estudiar, valorar, y desplegar un sistema de caudales ambientales basado en índices hidrológicos robustos, integrando la variabilidad

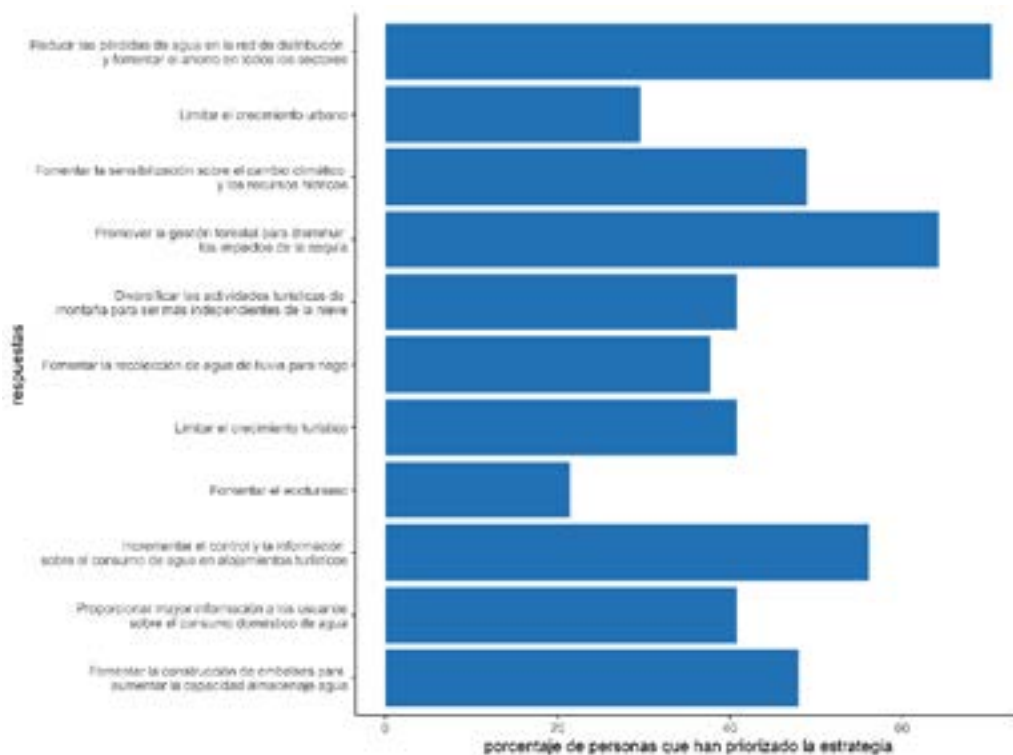


Figura 3.10. Resultado de la priorización de las estrategias de adaptación al cambio climático propuestas por los encuestados.

(Fuente: elaboración propia.)

Box 3.2: Percepción social de las medidas de adaptación

La capacidad de adaptación tiene un componente social muy arraigado. Las medidas de adaptación fomentadas tienen que estar en línea con la aceptación de la ciudadanía y la de los sectores económicos implicados. En este sentido, Andorra Recerca + Innovació realizó durante el año 2019 una encuesta a la población andorrana, posteriormente complementada con un taller participativo, para valorar la percepción social sobre el recurso agua en Andorra, sus amenazas en el contexto de cambio climático y la aceptación de las potenciales medidas adaptativas.

De los resultados de la encuesta se desprende que más de dos tercios de la población cree que el cambio global provocará una disminución de los caudales de los ríos en Andorra. Entre las medidas adaptativas con mayor aceptación destacan las siguientes: 1) reducción de las pérdidas de distribución de agua e implementación de medidas de eficiencia en el uso del agua en todos los sectores del país, 2) limitación del crecimiento urbano, 3) fomento de la educación sobre los efectos del cambio climático y los recursos hídricos y 4) impulso de la gestión forestal para disminuir los efectos de la sequía (Figura 3.10).

estacional, las diferentes tipologías de tramos de río y la totalidad de cuencas.

- Evaluar las funciones ecosistémicas de los ríos, especialmente en los tramos más vulnerables (tramos aguas abajo de captaciones, con elevado grado de artificialidad del cauce, con índices de biodiversidad bajos, con estructura poblacional de peces no adecuada, etc.), para seguir un sistema de control basado en caudales ambientales, entre otros índices, que garantice sus funciones y la calidad del sistema acuático y, por consiguiente, la calidad del agua.
- Valorar la aplicación de índices holísticos de calidad ecológica en tramos de río especialmente

vulnerables en los Pirineos.

- Desarrollar planes de restauración de riberas y márgenes de los cauces para mejorar las condiciones ecológicas de los tramos de río de elevada vulnerabilidad.
- Promover planes de financiación, incluyendo inversiones sustanciales en concientización, educación, investigación e involucramiento político para asegurar el mantenimiento de las funciones ecosistémicas en paralelo a impulsar la transición energética.

4. Impacto del cambio climático en la gestión de los embalses de producción hidroeléctrica: el caso de los valles del Neste d'Aure y del Neste de Louron

**Eric Sauquet (INRAE), Philippe Le Coent (BRGM),
Peng Huang (INRAE), Jean-Philippe Vidal (INRAE)**

La producción de energía hidroeléctrica representa un aprovechamiento importante en los Pirineos, como en todos los demás macizos montañosos franceses, que se verá afectado por el cambio global. El estudio de caso se centra en el futuro de este aprovechamiento entre los que actualmente existen en el sistema Neste. Este sistema fue diseñado para dar respuesta a la necesidad de agua de los entornos y de las actividades económicas en un conjunto de ríos de Gascuña. Así, se deriva parte del agua procedente de los valles del Neste d'Aure y del Neste de Louron almacenada en los embalses multi-uso de montaña (es decir, el agua turbinada, entre otras) para completar los limitados recursos hídricos locales en la región de Gascuña. Aunque la cuestión de la adaptación preocupa a todas las partes interesadas de la cuenca del Adur-Garona, no se ha esbozado aún ninguna estrategia de adaptación considerando los escenarios futuros. Este estudio de caso propone probar ciertas medidas mediante una cadena de modelización que simule el recurso hídrico y las acciones humanas sobre este recurso. Si no se produce una adaptación, el potencial de producción de electricidad podría reducirse considerablemente debido a la probable disminución de los caudales que entran en los embalses y a los compromisos prioritarios de los gestores de los mismos (apoyo a los caudales, suministro de agua potable y de riego, etcétera, en la zona cubierta por el sistema Neste). De este modo, se podría alcanzar a corto plazo el umbral de rentabilidad de la producción de electricidad. Se debatió con las partes interesadas del sistema Neste acerca de las diferentes opciones de adaptación, y después se probaron. Cambiar la rotación de cultivos (sustituir el maíz por el girasol) se veía como una medida de adaptación eficaz, pero no hay ninguna estrategia que parezca sostenible a lo largo del siglo XXI.

Citar como: Sauquet, E., Le Coent, Ph., Huang, P., Vidal, J.-P., 2023. Impacto del cambio climático en la gestión de los embalses de producción hidroeléctrica: el caso de los valles del Neste d'Aure y del Neste de Louron. En (Beguéría S., ed.), Adaptación al cambio climático en la gestión de los recursos hídricos de los Pirineos. Memorias científicas del proyecto PIRAGUA, vol. 2. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Zaragoza, España, 59-75.

<https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14684>

4.1. Introducción

La energía hidroeléctrica es la segunda fuente más importante de producción de electricidad después de la energía nuclear, representa aproximadamente el 11 % de la producción de electricidad en Francia (RTE, 2019) y es, hasta la fecha, la principal fuente de electricidad renovable (MTES, 2019). Completa la producción de base proporcionada por el parque nuclear durante los picos de demanda (especialmente durante las olas de frío en Francia).

De hecho, el potencial hidroeléctrico está fuertemente vinculado a la disponibilidad de agua y, por tanto, a su evolución por causa del cambio climático. El cambio climático va a repercutir en la capacidad para producir (cambios en la cantidad del caudal natural que entra en el embalse aguas arriba y en el momento en que lo hace), y en la demanda de energía (cambios en los picos de demanda, relacionados en particular con las olas de frío). En el caso de un embalse multiusos, podrían verse afectadas otras actividades que demandan agua y entrar en mayor competencia con el uso de producción de energía hidroeléctrica.

En los Pirineos franceses, la producción anual de electricidad es de unos 4100 GWh (fuente: Electricité de France, cifras 2015-2016; Société hydroélectrique du Midi, cifras 2015), es decir, algo menos del 9 % de la producción anual (fuente: RTE, balance de electricidad 2017).

La evolución de la energía hidroeléctrica se inscribe en un doble contexto político: el de la transición energética (cuyo objetivo es implantar una combinación energética basada principalmente en recursos renovables) y el de la gestión integrada de los recursos hídricos (que tiene como objetivo una gestión sostenible, equitativa y adaptada de los recursos hídricos, teniendo en cuenta los usos y fines contrapuestos, incluida la preservación del medio ambiente).

La producción de energía hidroeléctrica se realiza en un contexto de tensión sobre el agua. En la cuenca del Garona, los caudales objetivo de estiaje (DOE) solo se han respetado 8 de cada 10 años en el 38,5 % de los puntos de control durante el periodo 2000-2018 (fuente: Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement, DREAL). La

situación puede empeorar; según las conclusiones del estudio Garonne 2050 (Agence de l'Eau Adour Garonne, 2014), el volumen que hay que aportar para garantizar estos caudales reglamentarios, estimado actualmente en 760 hm³, podría aumentar hasta los 1.200 millones de m³ para 2050 debido al cambio climático. Dado que el uso de la energía tiene capacidad de almacenamiento, se plantea la cuestión de movilizar esta agua, no para la producción de energía hidroeléctrica, sino para otros usos (incluidos los servicios de los ecosistemas).

Un estudio de caso abordado por el INRAE (Instituto Nacional de Investigación Agrícola, Alimentaria y Medioambiental) en colaboración con la BRGM (Oficina de Investigación Geológica y Minera), centrado en los embalses de montaña del Neste d'Aure y del Neste de Louron (departamento de Altos Pirineos), ilustra la problemática de la gestión de los embalses dedicados a la producción de energía hidroeléctrica en el contexto pirenaico bajo el cambio global. Los embalses examinados forman un sistema único en los Pirineos. Sin embargo, se puede observar un equivalente de mayor tamaño en la cadena de embalses Durance-Verdon (Sauquet et al., 2016). Los embalses que se abordan aquí -al igual que en el sistema del Durance- son multiusos y los volúmenes se almacenan en la alta montaña y se liberan para la agricultura, la energía y el agua potable, con condicionantes ambientales en territorios fuera de los límites naturales de la cuenca vertiente.

4.2. El impacto del cambio climático en la producción de energía hidroeléctrica y la gestión de los embalses

En Francia, los embalses dedicados a la producción de energía hidroeléctrica se encuentran principalmente en zonas montañosas. El efecto que se espera por el cambio climático en estos territorios sería principalmente un aumento de las temperaturas del aire con una ola de deshielo avanzada y una reducción de las precipitaciones en forma de nieve. Las proyecciones hidrológicas prevén una menor gravedad del estiaje invernal (las temperaturas más elevadas favorecen la escorrentía en detrimento de la formación del manto de nieve). Se dispondría de más agua en invierno para producir energía en los momentos de mayor consumo (debido a la calefacción doméstica). Por otra parte, es probable que el cambio climático vaya acompañado una mayor gravedad de los caudales de estiaje en verano, lo que supondría una mayor movilización de los volúmenes almacenados para las necesidades de riego aguas abajo de las presas multiusos.

Sin embargo, se podría percibir el cambio climático como una oportunidad si se tuviera que generalizar el aire acondicionado y dependiendo del coste de la energía hidroeléctrica en comparación con el coste de producción por otros medios (por ejemplo, la energía fotovoltaica en un futuro sin la nuclear).

4.3. Estrategias de adaptación

4.3.1 Adaptación al cambio climático en la gestión de los embalses

La forma de adaptar la gestión de los embalses a los cambios requiere no solo una visión de los cambios que puede haber en la oferta y la demanda de agua, sino también una comprensión en profundidad de la dimensión social y económica del agua (Di Baldassarre et al., 2018; Kellner, 2021). La adaptación implica además un cambio de paradigma; hay que dejar a un lado las prácticas históricas para plantearse una planificación y una gestión que sean diferentes, sostenibles y adaptativas, dentro de un contexto que no sea estacionario.

El proceso de elaboración de estrategias de adaptación cuenta con tres etapas fundamentales: (i) evaluación exhaustiva del sistema en su contexto, (ii) diseño de estrategias de adaptación y su evaluación, y (iii) aplicación de la adaptación. Se plantean retos en cada etapa.

En hidrología, la primera etapa (i) se suele inscribir en una estrategia «top-down», guiada por un conjunto prescrito de proyecciones climáticas; una cadena de modelización lleva las proyecciones climáticas hasta una cuantificación de la respuesta del sistema estudiado (en este caso, la cuenca vertiente y los modos de gestión del agua) ante los cambios del clima en diferentes horizontes. El marco «prever y después actuar» está basado en el enfoque «top-down», pero se topa con incertidumbres climáticas que a veces son importantes, o están mal evaluadas o ambas cosas (Lempert et al., 2006; Hawkins y Sutton, 2010). El enfoque alternativo, denominado «botton-up», se centra en el sistema que se quiere estudiar y en su sensibilidad intrínseca a las perturbaciones del contexto. El enfoque «bottom-up» va a intentar comprender cómo reacciona el sistema a los cambios plausibles, identificar y priorizar los factores de control y, en última instancia, hacer que el sistema tenga una resiliencia específica a los cambios de estos factores. Un ejemplo de ello lo ofrece el sistema AEP estudiado por Schlef et al. (2018) ubicado en el sureste de Estados Unidos.

El estudio muestra que el sistema es más sensible a los cambios en las precipitaciones que a los cambios en la temperatura del aire. Las adaptaciones que se pueden plantear deben ser capaces de hacer frente a los cambios en las precipitaciones y la reducción de las incertidumbres sobre las precipitaciones futuras ayudará a poder valorar mejor los riesgos de fracaso. Hay que señalar que la mayoría de los estudios «bottom-up» se limitan a probar la sensibilidad a las principales variables climáticas: la precipitación y la temperatura. Se podrían examinar otras variables (como el cambio del uso del suelo, el crecimiento de la población, la regulación medioambiental, etc.) para proyectar una adaptación a contextos más amplios.

La evaluación de las estrategias (ii) plantea la cuestión del método a utilizar. Existe la posibilidad de realizar una evaluación económica de tipo «coste-beneficio». Si examinamos la literatura veremos que las estrategias para adaptar los métodos de gestión de los embalses suelen estar basadas en el conjunto de indicadores «RRV», relativos a la fiabilidad (Reliability), la resiliencia (Résilience) y la vulnerabilidad (Vulnerability) respectivamente, para evaluar su rendimiento en términos de frecuencia, duración y gravedad de los fallos (Hashimoto et al., 1982). Más recientemente se ha introducido el concepto de robustez para orientar la toma de decisiones en condiciones de incertidumbre (Maier et al., 2016). En general, se considera que un sistema es robusto cuando funciona de forma aceptable en una amplia gama de futuros plausibles (Metzger et al., 2021). Las nociones de fiabilidad, resiliencia, vulnerabilidad y robustez son útiles para calificar los sistemas sometidos a perturbaciones. Sin embargo, adaptarlos a los contextos locales (en particular, la expresión de los fracasos) supone por sí solo un trabajo con la ayuda de las partes interesadas sobre el terreno, especialmente porque las decisiones parecen depender de las definiciones elegidas para evaluar la solidez (Giuliani y Castelletti, 2016).

La preparación y la aplicación de las estrategias de adaptación (iii) requieren que haya una participación activa de los científicos, las partes interesadas y los gestores en el diseño de la adaptación.

Las controversias (por ejemplo, las relativas a la construcción de nuevas infraestructuras de almacenamiento para paliar la crisis del agua) no son una ayuda en esta fase (Zarfl et al., 2015; Berga, 2016). Emprender el proceso de adaptación al cambio global no es tarea fácil. Una de las razones es que los gestores son más bien conservadores en sus prácticas por miedo a las pérdidas o a la aparición de nuevos riesgos que podrían inducir los cambios. Otra es la reticencia a compartir datos sensibles (relacionados con las extracciones y el consumo), lo que hace problemática la modelización del funcionamiento actual y futuro del sistema estudiado.

Entre las opciones de adaptación preferidas para los embalses destinados a la producción de energía hidroeléctrica, podemos citar el aumento del rendimiento energético de las centrales. Van Vliet et al. (2016b) sugieren que un aumento del 10 % permitiría limitar el impacto negativo del cambio climático y mantendría la seguridad energética en la mayoría de las regiones del mundo. Otra solución sería instalar centrales eléctricas de bombeo (PSTS) que no solo aumentarían la eficiencia del uso del agua, sino que también ofrecerían la posibilidad de cooperar con otras fuentes de energía renovable (Gaudard et al., 2013; François et al., 2014; Emmanouil et al., 2021). El aumento del almacenamiento en los embalses se considera una opción prometedora en las regiones en las que es probable que aumenten las precipitaciones o la demanda de agua (por ejemplo, Bertoni et al., 2019; Fletcher et al., 2019) y se enfrentan a la oposición local basada en la preocupación medioambiental (Maran et al., 2014) y a importantes inversiones financieras (Zar et al., 2015). En lugar de modificar las infraestructuras, parece que cambiar las prácticas (es decir, replantearse las normas de gestión) sería una opción menos costosa y tendría la ventaja de ser reversible. Numerosos estudios han demostrado el interés de las operaciones adaptativas comparando las normas de explotación actuales con otros modos de explotación en escenarios de cambio global. En el caso de las cuencas dominadas por la nieve, se suele proponer llenar antes los embalses para beneficiarse de una ola de deshielo más temprana y anticiparse a la demanda de agua (Payne et al., 2004; Hendrickx y Sauquet, 2013).

Reexaminar las normas de gestión de las aguas altas (control de las crecidas) podría ser una manera que permitiría evitar «despilfarrar» agua (VanRheenen et al., 2004). Dada la creciente competencia entre la energía hidroeléctrica y el riego, una solución podría ser desplazar la producción hidroeléctrica principalmente del invierno (para la calefacción) al verano (para el aire acondicionado) para alinear así los dos usos del agua (Pereira-Cardenal et al., 2014), siempre que se produzca un cambio real en la demanda de energía.

La adaptación de las infraestructuras y de la gestión asociada al cambio global es una de las principales preocupaciones de la comunidad científica (McMillan et al., 2016). Es habitual que se propongan estrategias «sin arrepentimiento», que generan beneficios con independencia de los cambios, con el fin de eludir la dificultad de hacer frente a la incertidumbre futura (Hallegatte, 2009). La publicación de estudios de casos y de ejemplos de éxito ayudará a que aparezcan y se concreten estrategias de adaptación.

4.3.2 Adaptación al cambio climático en la cuenca Adur-Garona

En Francia se están desarrollando estrategias de adaptación al cambio climático con iniciativas adoptadas a diferentes escalas (desde la nacional hasta la local). En 2011, Francia adoptó un marco general de actuación -el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC)- con numerosas recomendaciones relacionadas con la investigación y la observación. Destacamos cinco prioridades del primer PNACC relacionadas con los recursos hídricos: (i) aumentar el conocimiento sobre el impacto del cambio climático; (ii) desarrollar herramientas específicas para vigilar los recursos hídricos y la asignación del agua en una perspectiva a medio y largo plazo; (iii) fomentar el ahorro de agua y garantizar un uso más eficiente del agua; (iv) promover un desarrollo acorde con los recursos hídricos locales disponibles; y (v) tener en cuenta medidas de adaptación en la planificación de la gestión del

agua. El objetivo es conseguir que las extracciones de agua se reduzcan en un 20 % para la década de 2020. En 2018, después de haber realizado consultas y una evaluación del primer PNACC, se adoptó un segundo PNACC. Su objetivo es lograr que Francia se haya adaptado para 2050 en un contexto de aumento de la temperatura de +1,5 a 2 °C a nivel mundial con respecto al siglo XIX, y propone un conjunto de 58 acciones a lo largo de los 5 años del PNACC-2 con nuevas prioridades.

A un nivel más local, las estrategias de adaptación entran ahora en el ámbito de aplicación de los Esquemas Directores de Ordenación y Gestión de las Aguas (SDAGE). Los SDAGE, elaborados cada cinco años desde 1992 en colaboración con las partes interesadas, definen las principales orientaciones estratégicas de las agencias del agua francesas. Los objetivos se definen de acuerdo con el marco normativo francés y las directivas europeas, en particular la Directiva Marco del Agua. En 2018, la Agencia del Agua Adur-Garona publicó un Plan de Adaptación al Cambio Climático redactado con la colaboración de las partes interesadas locales. Este plan formaliza las principales orientaciones estratégicas para volver al equilibrio a través de una serie de posibles acciones concretas. La aplicación de las soluciones entra en el ámbito de los proyectos territoriales de gestión del agua (PTGE).

Entre las últimas acciones, citaremos (i) la creación de una plataforma de buenas prácticas «Buenas prácticas para el agua del gran Suroeste» (<https://bonnespratiques-eau.fr/>) dedicada a acoger y compartir conocimientos e iniciativas en el territorio y (ii) un informe sobre las «condiciones de movilización de los embalses para energía hidroeléctrica en apoyo al estiaje en la cuenca del Adur-Garona» (Auverlot et al., 2021), que recoge siete recomendaciones de diversa índole (técnica, económica, política, etc.) y (iii) un plan estratégico 2021-2027 para volver al equilibrio de la gestión cuantitativa de los recursos hídricos, elaborado por el Comité de la Cuenca del Adur-Garona.

En este último documento se explican y se cuantifican aproximadamente las medidas que se pueden activar para reducir los déficits (Tabla 4.1); la liberación de agua de las infraestructuras de energía hidroeléctrica en apoyo al estiaje es

una contribución importante y queda un déficit residual en 2050.

Tabla 4.1. Balance global de las necesidades/recursos de aguas superficiales en 2050 (fuente: Agence de l'eau Adour-Garonne).

	Volumen (Mm³)
Déficit estimado inicialmente para 2050	1000-1200
Aumento del ahorro de agua (consumo)	200
Aumento por soluciones basadas en la naturaleza/agroecológicas	50-250
Movilización de las capas libres	20
Stocks adicionales para el apoyo al estiaje, de los cuales:	150-500
• Creación de infraestructuras de realimentación	(80-135)
• Movilización de centrales hidroeléctricas	(70-375)
Movilización de las pequeñas infraestructuras existentes	30
Infraestructuras de sustitución, reutilización	20-40
Nuevo déficit estimado en 2050	200-700

4.4. Lecciones de un estudio de caso: la gestión en los valles del Neste d'Aure y del Neste de Louron

4.4.1 Contexto

El estudio de caso se refiere a los lagos-embalses de los valles del Neste d'Aure (Oule y Orédon) y del Neste de Louron (Pouchergues y Caillaouas), cuya concesión posee la Société Hydro-Electrique du Midi (SHEM) desde 2003. Cada embalse se gestiona de forma coordinada con los demás para satisfacer las necesidades energéticas, por un lado, y para realimentar diecisiete afluentes de la margen izquierda del Garona situados en la meseta de Lannemezan, por otro. Estos embalses (Cuadro 4.2) son por tanto un componente esencial del «sistema Neste», cuya gestión corre a cargo de la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne CACG (Figura 4.1). Las aguas del Neste se desvían a la altura de Sarrancolin y se unen al Canal del Neste. La Figura 4.2 muestra la ubicación de los embalses en la red hidrográfica aguas arriba de Sarrancolin y sus interacciones con otras instalaciones. Algunas de estas interacciones utilizan recursos externos: el lago de Orédon recibe los caudales reservados y los posibles vertidos de los embalses de Aubert, Aumar y Cap de Long gestionados por EDF, un productor de electricidad competidor de la SHEM.

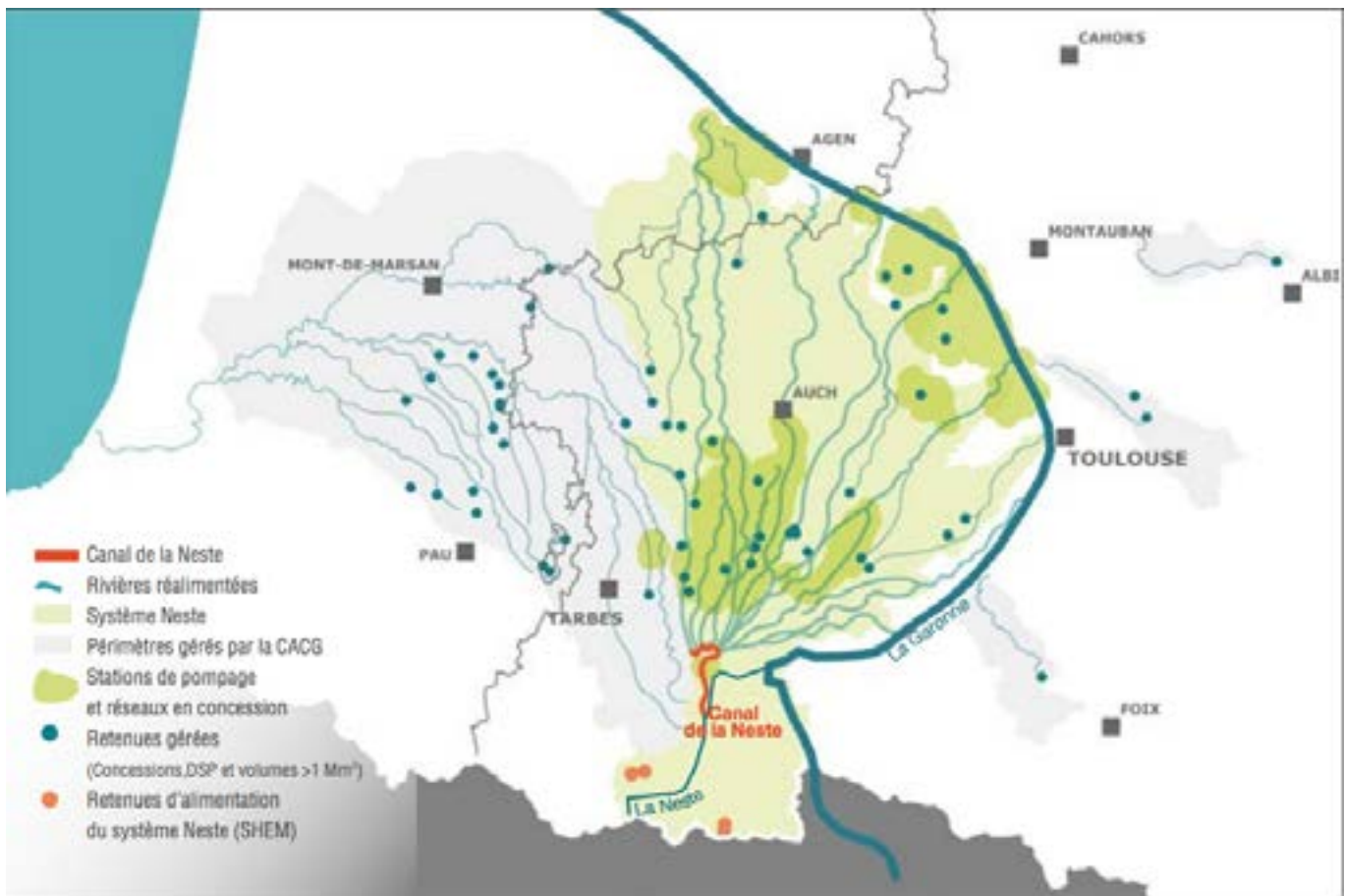


Figura 4.1. Área de gestión de la CACG. Los lagos-embalses de Oule, Orédon, Caillaouas y Pouchergues aparecen como “Embalses de alimentación del sistema Neste (SHEM)”.

(Fuente: CACG.)

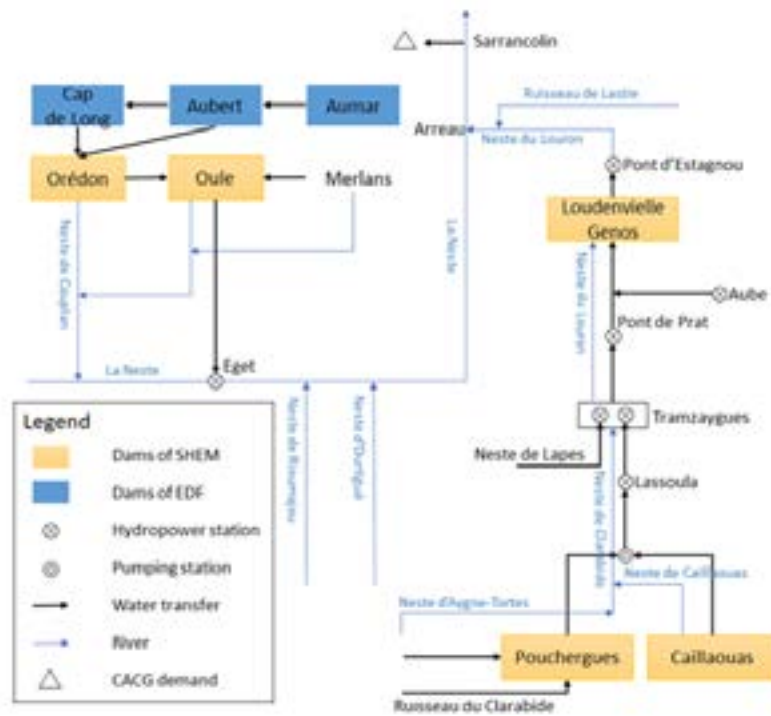


Figura 4.2. Esquema sinóptico de los valles del Neste d'Aure y del Neste de Louron.

(Fuente: elaboración propia.)

Tabla 4.2. Descripción de los embalses de alta montaña.

	Valle	Capacidad (Mm ³)	Altitud (m)	Superficie (km ²)
Aure	Oule	16.6	1816	28.4
	Orédon	7.27	1849	13
Oule	Caillaouas	25.4	2172	6.7
	Pouchergues	0.83	2111	9.9

Los lagos-embalses de los valles del Neste d'Aure y del Neste de Louron (denominados «lagos-embalses de alta montaña») almacenan el agua del deshielo en primavera y la liberan cuando es el momento oportuno. Las operaciones de almacenamiento y evacuación se realizan de forma coordinada entre los dos valles: la SHEM moviliza los stocks en un embalse en lugar de otro en función de consideraciones económicas (rendimiento energético) e hidrológicas (nivel de llenado); asimismo, la CACG utiliza los recursos de alta montaña si el Neste de Sarrancolin no puede suministrar el agua necesaria a las zonas abastecidas por el Canal del Neste o si los embalses de «piedemonte» que hay en el perímetro (véanse los puntos azules en la Figura 4.1) no pueden soportar la demanda de agua aguas abajo.

Cada año se reserva un volumen total de 48 Mm³ en los embalses gestionados por la SHEM para garantizar los usos relacionados con el riego, el suministro de agua potable y el buen estado ecológico de los cursos de agua realimentados del sistema Neste entre el 15 de junio y el 1 de marzo del año siguiente. Al final de la campaña de apoyo al estiaje, la SHEM aprovecha el agua restante para turbinarla dando prioridad a los días en que los precios de la energía son más altos (principalmente en invierno). Las centrales eléctricas alimentadas por estos embalses producen unos 180 GWh anuales. El 1 de marzo, los embalses están al mínimo.

Los datos de extracción proporcionados por la SHEM y la CACG parecen revelar un estancamiento de las extracciones de agua desde principios de la década de 2000, con una importante variabilidad interanual de la demanda de agua de riego que condiciona la movilización de los 48 Mm³ en función de las condiciones meteorológicas del año.

4.4.2 Efectos del cambio climático

Se ha puesto en marcha un análisis de sensibilidad a través de una modelización de los caudales de entrada a los lagos-embalses (Huang, 2022) con el objetivo de medir cómo reacciona el potencial de producción a las perturbaciones climáticas. Se perturbó el clima actual para explorar de manera sistemática una amplia gama de posibles cambios. Estos 2625 climas perturbados se introdujeron en el modelo hidrológico GR6J (Pushpalatha et al., 2011), que está basado en datos históricos y simula los caudales de entrada en los embalses. No hay modelización de los usos, se examina la capacidad de las cuencas vertientes para suministrar agua a las infraestructuras.

Se resume el análisis de sensibilidad con una superficie de respuesta (Figura 4.3) que describe los cambios en los volúmenes anuales disponibles aguas arriba de los embalses en función de los cambios en las precipitaciones y la temperatura.

Los colores de los puntos indican los cambios en la disponibilidad de agua (expresada como el volumen anual producido por las cuencas que alimentan los lagos-embalses) por rango de cambio en las precipitaciones y la temperatura anuales. El tamaño del punto indica la dispersión dentro de los diferentes rangos. La Figura 4.3 presenta también las trayectorias climáticas medias de las cuencas que alimentan los lagos-embalses. La curva negra con puntos verdes se ha formado a partir de seis proyecciones RCP8.5 y la curva con puntos azules a partir de seis proyecciones RCP4.5, obtenidas del proyecto CLIMPY (Amblar-Francés et al., 2020). Los puntos están asociados a diferentes horizontes (2030, 2040, 2050, 2060, 2070, 2080 y 2090).

Un primer diagnóstico del funcionamiento del sistema consiste en examinar en la figura 4.3 si las entradas naturales pueden garantizar al menos 48 Mm³, lo que permitiría conservar el agua para turbinarla en invierno; en caso contrario, esta situación extrema se considera crítica. Con RCP8.5, la disponibilidad de 48 Mm³ no está garantizada a finales de siglo si se examina la dispersión. El umbral de rentabilidad de la producción de electricidad de 69,8 Mm³ aparece en la figura y ya se ha superado o probablemente se superará con el aumento de las temperaturas. Este resultado pone en entredicho el uso hidroeléctrico.

De forma similar a los resultados presentados en el proyecto Imagine2030 (Hendrickx y Sauquet, 2013), el cambio climático dará lugar en la hidrología natural de los arroyos de montaña a una ola de deshielo más temprana y a una menor cantidad de precipitaciones de nieve, modificando la estrategia de llenado de los embalses (concomitante con el periodo de deshielo) como consecuencia de las mayores temperaturas del aire. La reducción de las entradas a los embalses (como muestra la figura 4.4 para los embalses de Caillaouas y Pouchergues) inducida por una fuerte disminución de las precipitaciones y, en consecuencia, del potencial de producción, parece casi segura según las proyecciones del CLIMPY. Además de esta reducción, el productor de energía hidroeléctrica está sujeto a condicionantes normativos (caudales ecológicos y volumen contractual dedicado a otras necesidades). El respeto de estas limitaciones expresadas aguas abajo de los embalses inducirá una menor flexibilidad para la turbinación del agua en el periodo invernal en respuesta a la demanda de energía. En estas condiciones, la energía hidroeléctrica producida en los Pirineos no podrá contribuir a la red eléctrica francesa como ocurría en el pasado.

Por lo tanto, estos cambios -que afectan a los demás macizos- hacen que se cuestione la contribución de la energía hidroeléctrica a la

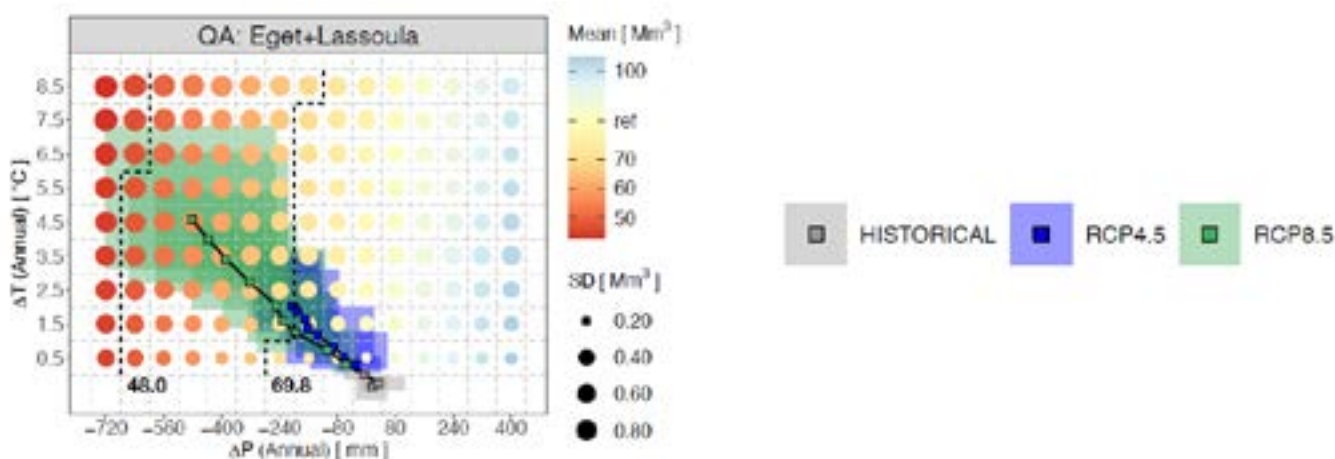


Figura 4.3: Superficie de respuesta que caracteriza la sensibilidad de las entradas naturales totales a los lagos-embalses a las perturbaciones climáticas. Las curvas representan posibles trayectorias desde el periodo actual hasta el final del siglo, muestreadas cada 10 años con los escenarios RCP4.5 (azul) y RCP8.5 (verde). Cada punto es representativo de un periodo consecutivo de 20 años (media de 6 proyecciones climáticas). Las zonas en azul y verde representan la dispersión de las proyecciones del clima del proyecto CLIMPY. Los límites de las zonas críticas para los usos en relación con el cambio climático se identifican con líneas en negro.

(Fuente: elaboración propia.)

producción de electricidad en las próximas décadas y la probabilidad de ciertos escenarios de combinación energética.

4.4.3 Estrategias de adaptación

No está prevista actualmente ninguna estrategia para el sistema Neste. Se ha iniciado la elaboración de estrategias de adaptación con las partes interesadas de los territorios (talleres de trabajo, organizados por la BRGM y el INRAE, que reúnen a los principales actores del agua afectados: CACG, SMEAG, SHEMA, ENGIE, Agence de l'Eau, OFB y el departamento de Gers).

La intención ha sido elaborar una lista de opciones de adaptación y probar su eficacia individualmente o bien la eficacia de una combinación de esas opciones, teniendo en cuenta las vulnerabilidades expresadas de los usos. Hay que señalar que este ejercicio de recopilación de opciones forma parte de un proyecto de investigación y que se ha dado libertad para proponer acciones iconoclastas (no aceptables

para las partes interesadas del territorio).

Se han identificado y expresado las vulnerabilidades del sistema Neste a través de variables e indicadores que definen los umbrales de fallo a partir de los cuales el sistema se considera no funcional. Las posibles variables e indicadores son:

- La suma de los caudales a la salida de los ríos realimentados por el sistema Neste (Figura 4.1) (variable) y los caudales de crisis (indicador),
- El volumen turbinado por los embalses de alta montaña durante el año (variable) y los ingresos mínimos necesarios para mantener estos embalses (indicador),
- El volumen de los embalses del sistema Neste (variable) y los volúmenes objetivos de llenado (indicador).

Se han agrupado las acciones según el impacto que se prevé que tengan sobre los riesgos de fallo. Los tipos de impacto son:

- Modificación de la función de la

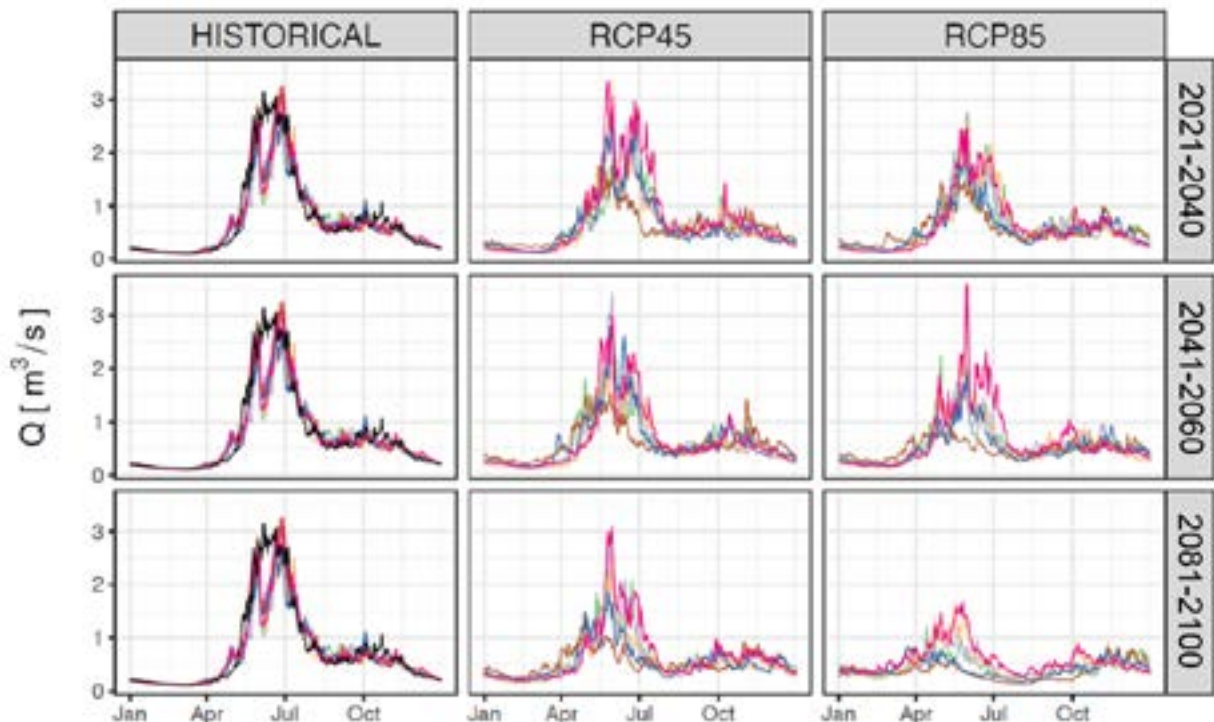


Figura 4.4. Evolución del régimen hidrológico de las entradas a los lagos-embalses de Caillaouas y Pouchergues en diferentes horizontes (las simulaciones obtenidas con el reanálisis SAFRAN-PIRAGUA son la referencia histórica actual, las simulaciones con cambio climático se obtienen con seis proyecciones desarrolladas por el proyecto CLIMPY).

(Fuente: elaboración propia.)

demanda de agua: reducción del pico de demanda en el periodo de estiaje, disminución de la demanda total sin cambiar la distribución (cambios en los cultivos, variedades, etc.).

- Aumento de los recursos totales mediante el incremento de la capacidad de almacenamiento (creación de nuevos embalses o mejora de los embalses no utilizados), la modificación de las transferencias entre cuencas (petición de complementos de embalses gestionados por otros productores) y/o la adaptación de la capacidad de llenado de los embalses del piedemonte (caudal de las torrenteras).
- Modificación de la distribución de los recursos dedicados a los distintos usos, lo que conlleva también un cambio de la función de demanda de agua (modificación de los volúmenes que se pueden retirar, modificación de los precios del agua, levantamiento temporal de las restricciones medioambientales, etc.).

Para responder a la pregunta sobre la eficacia de las trayectorias de adaptación, se optó por el método de elaboración llamado de «Vías políticas dinámicas y adaptativas» (Haasnoot et al., 2013). Su finalidad es ayudar a los responsables de la toma de decisiones a identificar las acciones de adaptación a corto plazo y las acciones posibles a largo plazo, caracterizando claramente los umbrales en los que las acciones dejan de ser eficaces. Las decisiones se toman a lo largo del tiempo, en interacción dinámica con el sistema, a partir de un esquema de síntesis que caracteriza los posibles futuros y las vías de acción que se pueden tomar para adaptarse a ellos. Este esquema de síntesis se traduce en una representación visual de las trayectorias en forma de línea de metro o de autobús que facilita las interacciones con los actores (Figura 4.5).

Su aplicación requiere una modelización (Figura 4.6) que integre los usos y las infraestructuras de gestión del sistema Neste y de los lagos-embalses que no se ha desarrollado en el marco del proyecto PIRAGUA, dada la complejidad del sistema Neste y el acceso errático a los datos de uso (extracciones, consumos, factores de control, prácticas, etc.). En este caso se ha utilizado el modelo hidrológico GR6J (Pushpalatha et al.,

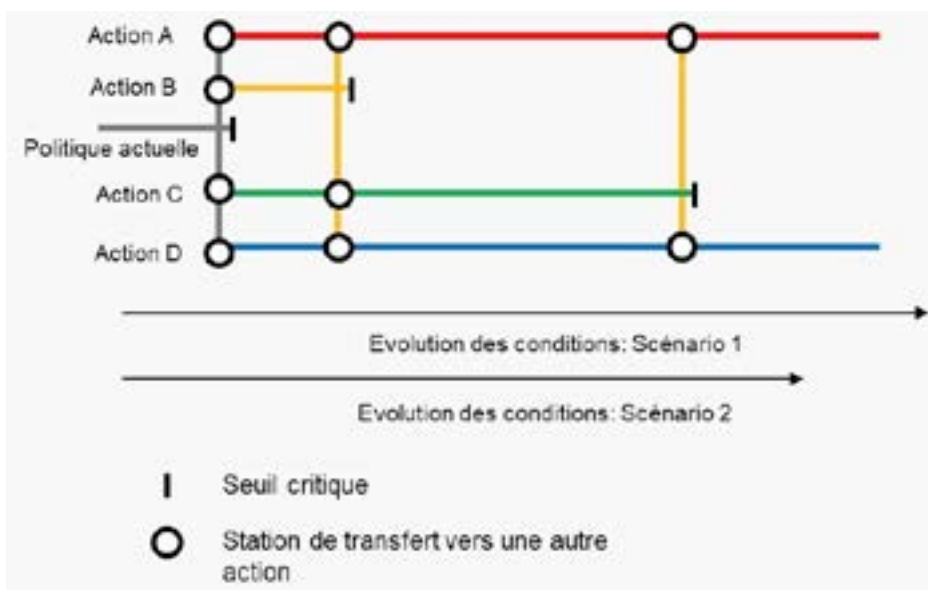


Figura 4.5: Esquema conceptual de las trayectorias de adaptación.

(Fuente: elaboración propia.)

2011) empleado para el análisis de sensibilidad. Se completó con bloques que describen la acción humana en los caudales de los ríos, entre ellos:

- Las reglas de gestión de las infraestructuras gestionadas por la SHEM, cuya representación se inspira en Hendrickx y Sauquet (2013) (acción de almacenamiento/ evacuación por optimización numérica del valor del agua),
- La demanda medioambiental, que se expresa a través del cumplimiento de los Caudales Objetivo de Estiaje (DOE),
- La demanda agrícola estimada por el modelo ADEAUMIS (Leenhardt y Trouvat, 2004) en una versión actualizada por C. Catalogne (Icare²).

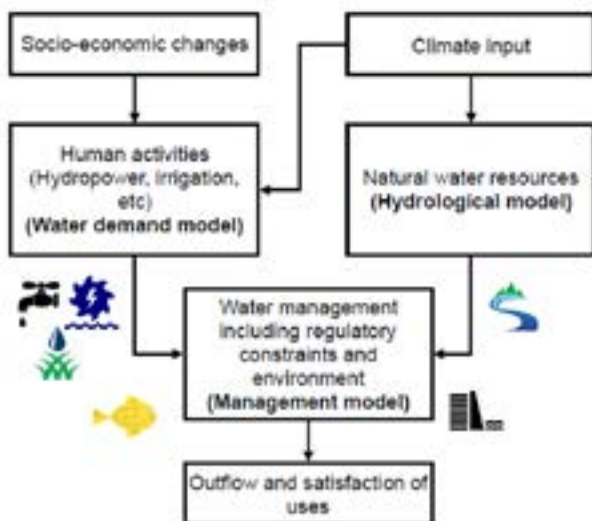
Por último, se probaron diferentes medidas de adaptación:

- [G-0] Gestión sin más condicionantes que el cumplimiento de una petición de la CACG de 48 Mm³, frente a [G-1] gestión condicionada por los niveles de los embalses superados en el año en curso y la derogación del DOE aguas abajo de la toma del

Canal del Neste (gestión actual).

- [M-0] Rotación agrícola actual frente a [M-50 y M-100] reducción del cultivo de maíz en favor del girasol: 50 % y 100 %.
- [DOE-100 -] Cumplimiento frente a [DOE-80 - -] disminución de las exigencias medioambientales en los ríos de Gascuña realimentados en un 20 %.
- Para todos: mismo escenario para el AEP (consumo unitario actual, condicionado por la evolución de la población) y la industria (se mantiene al nivel actual).

Se ha medido la eficacia de las trayectorias de adaptación que combinan estas medidas a partir de un objetivo de llenado para el 15 de septiembre (variable) con un umbral de fallo (indicador) de 10 Mm³ en los embalses. El fallo se alcanza en el año TD, definido como el último año de la primera ventana móvil de 10 años que contiene dos fallos. La figura 4.7 muestra que, a pesar de las drásticas adaptaciones de los usos (abandono del cultivo de maíz y reducción de los DOE), el sistema parece estar en crisis a mediados de siglo con el escenario RCP 8.5.



Hydrological model
Rainfall-runoff model GR6J (Pushpalatha et al., 2011) coupled with a semi-distributed snow module Cemaneige (Riboust et al., 2019)
Water demand model
Energy demand: a linear model linking HDD (Heating Degree Day) (Spinoni et al., 2018) with historical production data from SHEM
CACG demand:
1. ENV (environmental use): $f(Q_{nat}, \text{storage of the CACG reservoirs})$
2. DRI (drinking water): $f(\text{population, network efficiency})$
3. IND (Industrial use): constant
4. IRR (Irrigation water): ADEAUMIS (Leenhardt et al., 2004) applied by C. Catalogne for the Neste region with input of S, P, T, and PET
Management model
SHEM management: Linear programming optimization method in a deterministic way
CACG management: decision tree of seasonal management
1. $Q_{canal} = f(\text{Demand, } Q \text{ at Sarrancolin})$ while respecting DOE at Sarrancolin
2. $V_{CACG_reservoir} = f(Q_{canal}, \text{Demand, } Q_{nat})$

Figura 4.6. Marco genérico de modelización.

(Fuente: elaboración propia.)

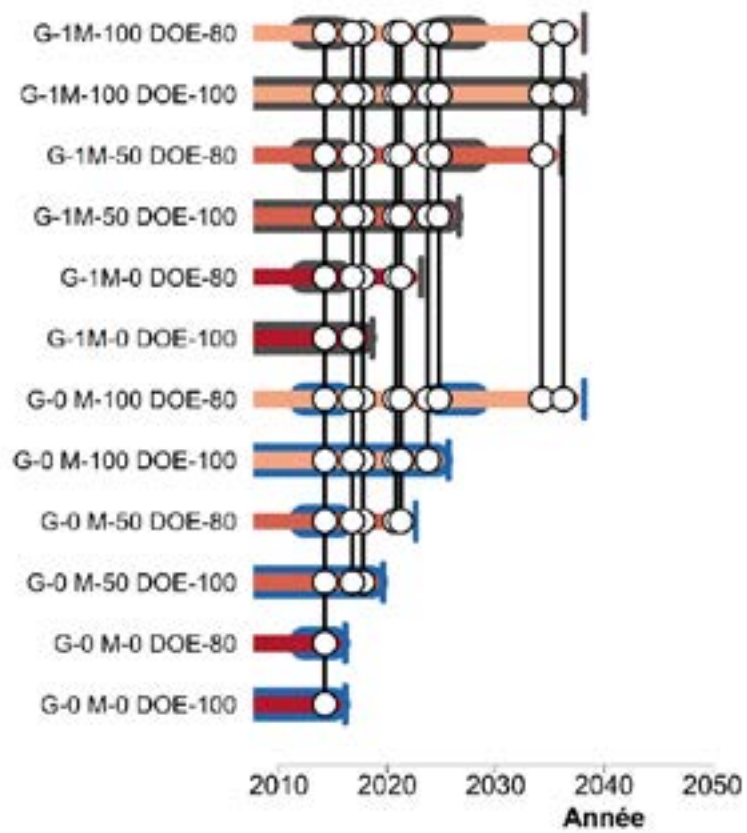


Figura 4.7. Sostenibilidad de las trayectorias de adaptación que combinan diferentes medidas (la combinación G1-M0-DOE-100 corresponde al contexto actual de práctica y gestión).

(Fuente: elaboración propia.)

4.5. Conclusiones

El estudio del impacto del cambio climático en los lagos-embalses de los valles del Neste d'Aure y del Neste de Louron ha requerido aplicar herramientas específicas que relacionan el clima, el recurso natural, los diferentes usos (incluyendo la energía y el riego) que movilizan volúmenes en los embalses y los modos de gestión específicos del sistema Neste.

Los resultados obtenidos con las proyecciones climáticas CLIMPY muestran que:

- El cambio climático modificará fuertemente los procesos relacionados con la formación y el deshielo del manto de nieve y, por tanto, la hidrología de la zona,
- La producción de energía hidroeléctrica es económicamente frágil,
- Cambiar la rotación de cultivos parece ser una medida de adaptación eficaz, pero no hay ninguna estrategia que parezca sostenible para el siglo XXI.

Las herramientas no son perfectas, presentan sesgos inherentes a una descripción simplificada (colocación óptima del agua en función de las necesidades expresadas, aplicación de cuotas y prácticas de riego sin ajustar, no se tienen en cuenta las previsiones meteorológicas, etc.). Sin embargo, son pertinentes para medir la sensibilidad del sistema a las alteraciones climáticas, probar escenarios de adaptación «bien definidos» y poner en marcha reflexiones sobre la vulnerabilidad del sistema.

Las partes interesadas han participado en el proyecto (intercambios de datos, talleres de reflexión, etc.). Es necesario dar a conocer las conclusiones más allá de este círculo para movilizar a todos los actores y, sobre este sistema, hay que identificar sin duda otras estrategias de adaptación.

No se pueden generalizar estas conclusiones sobre la eficacia de las estrategias aquí probadas a los demás lagos-embalses de los Pirineos, cuya gestión es diferente (distinto contexto climático, otro contexto hidrológico, contexto normativo diferente, otros usos vinculados a estos embalses, etc.).

5. Adaptación al cambio climático en la agricultura de regadío: el caso de Riegos del Alto Aragón

**Santiago Beguería, David Haro Monteagudo,
Leticia Palazón (EEAD-CSIC)**

La agricultura de regadío ha sido un motor económico y un vector de desarrollo territorial en el piedemonte del Pirineo central español. La construcción de grandes obras de regulación hidrológica (presas y embalses) y canales de distribución a lo largo del siglo XX permitió la puesta en regadío de grandes superficies, asegurando la producción de alimentos y mejorando la calidad de vida de los habitantes del piedemonte. Los grandes sistemas de riego, sin embargo, arrastran problemas derivados de su diseño y concepción en una época muy diferente a la actual, y se enfrentan a nuevos retos en el siglo XXI.

Entre estos destaca el previsible descenso de los recursos hídricos disponibles debido al cambio climático, aunque no hay que olvidar otros como la reducción de la capacidad de los embalses debido al aterramiento o el incremento de los costes de producción debido a los precios de la energía.

En este trabajo se ha analizado el sistema de Riegos del Alto Aragón en la provincia de Huesca, un sistema que disfruta en la actualidad de un adecuado nivel de sostenibilidad.

Esta situación, sin embargo, se verá amenazada en el futuro de cumplirse las proyecciones de cambio climático analizadas. En concreto, se prevé una disminución de los aportes de caudal a los embalses que alimentan el sistema, así como cambios en la estacionalidad de los aportes con mayor peso de los caudales invernales y estiajes más pronunciados y prolongados. Esto repercutirá en la sostenibilidad del sistema, reflejándose en una mayor frecuencia e intensidad de situaciones en las que no se puedan satisfacer las demandas de riego establecidas en la actualidad.

El análisis demuestra la ineficacia de las soluciones centradas en el aumento de la oferta de agua (tanto a nivel de grandes infraestructuras de regulación hidrológica como a nivel interno mediante balsas de riego), sobre todo teniendo en cuenta las proyecciones climáticas. Los esfuerzos deben centrarse, por tanto, en asegurar la dotación actual de agua de riego, a la vez que se garantiza una mejor gestión de la demanda de agua. En un escenario de progresiva mayor escasez del recurso, es necesario plantear medidas (normativas, de gobernanza, etcétera) orientadas a maximizar la rentabilidad por unidad de agua suministrada, marginando prácticas y cultivos menos rentables.

Los regantes de RAA han demostrado una gran capacidad de adaptación, aunque los cambios en las últimas décadas se han debido más a la acción individual que a un plan premeditado y consciente por parte de las autoridades. Así, RAA sigue siendo un regadío relativamente extensivo que no ha sido capaz de crear una potente agroindustria que permita el desarrollo de cultivos de alto valor añadido. Ante los retos del siglo XXI resulta de vital importancia que exista una implicación mayor a todos los niveles, desde la Administración hasta los pequeños agricultores y los emprendedores locales, para que el sistema se pueda convertir en el modelo de agricultura sostenible de elevada productividad que necesita la sociedad del siglo XXI.

5.1. Introducción

Según la base de datos Corine Land Cover (CLC, 2018), existen 360.407 ha de secano y 55.975 ha de regadío en los Pirineos, es decir aproximadamente el 7% y el 1% del territorio, respectivamente (Figura 5.1). Se trata, por tanto, de una actividad muy minoritaria en el seno de la cordillera. Esta situación contrasta con la importancia que tenía la agricultura en la cordillera en el pasado. Por ejemplo, Lasanta (1989) estimó la superficie máxima cultivada en algunos valles del Pirineo aragonés, donde llegó a cultivarse entre el 5,66% de la superficie total en el Valle de Tena y el 25,18% del total en el valle de Hecho. Si sólo se tiene en cuenta la superficie situada por debajo de 1600 m s.n.m. (que es la que puede cultivarse por limitaciones climáticas), entonces la proporción de la superficie máxima cultivada sube hasta el 22,1% en el Valle de Aragüés o el 32,8% en el Valle de Aísa, como valores extremos. Esto significa un aprovechamiento no solo de los fondos de valle, sino también de laderas con pendientes muy acusadas, a veces mediante campos de carácter nómada, cultivados durante 2 ó 3 años seguidos de barbechos muy largos. En otros casos las laderas se aterrizaron para poder contar con cultivos más permanentes.

La agricultura de regadío en las áreas de piedemonte supone la principal demanda de los recursos hídricos generados en los Pirineos, con un 83% sobre el total de usos consuntivos.

En los piedemontes de la cordillera, sin embargo, la situación es muy distinta, ya que con casi 2,4 millones de hectáreas de superficie cultivada, la agricultura constituye un uso del suelo extremadamente importante, en conjunción con la ganadería, que se aprovecha de muchos de los productos agrícolas (maíz, alfalfa) además de pastorear en las superficies de monte, en los barbechos cerealistas, e incluso en muchos campos de regadío durante el otoño-invierno.

Por lo que concierne al uso de recursos hídricos, es importante distinguir entre la agricultura de secano, que se nutre exclusivamente de las precipitaciones, y la agricultura de regadío, que recibe aportes adicionales extraídos de cauces y acuíferos.

Existen importantes superficies de agricultura regadío a los pies de los Pirineos, en ambas vertientes, que utilizan fundamentalmente recursos hídricos generados en la cordillera. De hecho, la agricultura de regadío de los piedemontes supone el uso principal de los recursos hídricos de los Pirineos. Con un uso promedio de 5.315 hm^3 anuales, representa el 79% del uso de los recursos hídricos de los Pirineos. (Beguería, 2023: Tabla 1.1).

Existen importantes diferencias entre sistemas de explotación (Tabla 5.1). Así, el consumo hídrico de la agricultura llega a representar porcentajes superiores al 95% del agua consumida en algunos sistemas del valle del Ebro y, por el contrario, nulos en algunos sistemas de la vertiente francesa. Por países, la vertiente francesa utiliza en la agricultura unos 800 hm^3 anuales, lo que representa el 44% del uso de los recursos hídricos generados en dicha vertiente. En la vertiente española la agricultura utiliza 4.513 hm^3 anuales, lo que representa el 92% del total del consumo de agua. Y en Andorra se usan en agricultura 2 hm^3 anuales, es decir, el 16% de los usos totales.

Existen importantes diferencias entre los regadíos español y francés. En Francia predomina un uso difuso de aguas de origen subterráneo o bien a partir de la captación directa de los numerosos cauces,

en ocasiones alimentados de forma semi-artificial como en el caso de los cursos de agua de Gascuña alimentados por el canal de Neste, construido en 1863. En España, en cambio, se han desarrollado sistemas de regadío ligados a grandes embalses de regulación a los pies de los Pirineos y una compleja red de canales de distribución. Los grandes Planes de Regadío se empezaron a planificar a comienzos del siglo XX, aunque en algunos de ellos las ideas de transformación surgieron desde al menos mediados del siglo XIX. Estos Planes de Regadío ocupan grandes extensiones, a veces lejos de la red fluvial, y se basan en la regulación de ríos mediante embalses de gran tamaño y en la transferencia de agua a través de grandes canales. Destacan así el Plan Jaén, el Plan Badajoz, los regadíos del Duero mediante el Canal de Castilla, y el más extenso de todos, los Riegos del Alto Aragón. Estos Planes de regadío tuvieron por objeto fijar a la población rural, fomentar la agroindustria y producir para un mercado nacional o internacional (Beguería et al., 2022).

Para explicar la diferente intensidad con que se aprovechan los recursos hídricos en una y otra vertiente de los Pirineos hay que atender, sobre todo, a las características climáticas que predominan en el sur de Francia y en la Depresión del Ebro.

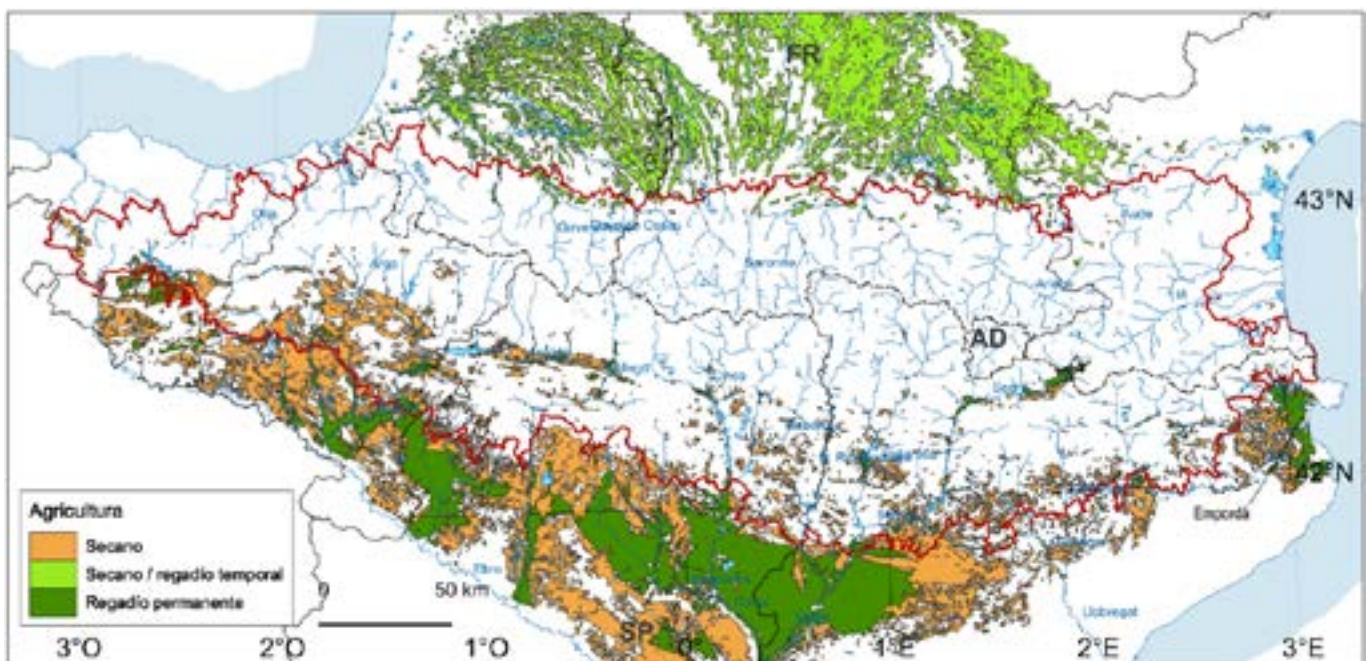


Figura 5.1. La agricultura en los Pirineos (área delimitada por la línea roja) y sus áreas de piedemonte.

(Fuente: Corine Land Cover, 2018; CHE, 2020; Gobierno de Andorra. Elaboración propia.)

Tabla 5.1. Uso del agua en agricultura de regadío, por sistemas de explotación (volumen promedio anual y porcentaje sobre el uso de agua total). Fuente: dotaciones de los Planes Hidrológicos de Cuenca.

Organismo de cuenca	Sistema de explotación	Uso agrícola	
		(hm^3 año-1, %)	
ACA	Ter-Llobregat	197	0,27
ACA	Fluvià	22	0,68
ACA	Muga	68	0,81
AEAG	La Garonne de sa source au confluent de l'Ariège	21	0,23
AEAG	L'Ariège	41	0,63
AEAG	La Garonne du confluent de l'Ariège au confluent du Tarn	35	0,29
AEAG	La Garonne du confluent du Tarn au confluent du Lot	51	0,78
AEAG	L'Adour de sa source au confluent du Larcis	53	0,72
AEAG	L'Adour du confluent du Larcis (inclus) au confluent de la Midouze	37	0,78
AEAG	L'Adour du confluent de la Midouze au confluent des Gaves Réunis	24	0,57
AEAG	Le Gave de Pau de sa source au confluent du Béz	0	0
AEAG	Le Gave de Pau du confluent du Béz (inclus) au confluent de l'Adour	8	0,13
AEAG	Le Gave d'Ossau	0	0
AEAG	Le Gave d'Oloron	4	0,31
AEAG	L'Adour du confluent des Gaves Réunis au confluent de la Nive	1	0,34
AEAG	L'Adour du confluent de la Nive (incluse) à l'océan	0	0
AEAG	Les côtiers de l'embouchure de l'Adour au confluent de l'Untxin (inclus)	0	0
AEAG	La Bidasoa du confluent du Rio Latsa à l'océan	0	0
AERMC	Côtiers de la frontière espagnole - l'Aude et el Segre (bassin français)	186	0,75
AERMC	L'Aude de sa source à la Méditerranée	51	0,61
CHC	Bidasoa	1	6%
CHC	Urumea	0,5	2%
CHC	Oria	1	4%
CHC	Urola	0,5	5%
CHC	Deba	0,5	3%
CHC	Nervión	1,5	1%
CHE	Andorra	2	0,16
CHE	Segre-Noguera Pallaresa	972	0,96
CHE	Noguera Ribagorzana-Ésera	849	0,96
CHE	Gállego-Cinca	1277	0,98
CHE	Aragón	758	0,98
CHE	Ega-Arga-Irati	193	0,68
CHE	Zadorra	86	0,68
CHE	Garona	0	0,04
TOTAL		5315	0,83

No debe olvidarse que en esta última las precipitaciones son inferiores, en general, a 450 mm anuales y están en torno a los 300 mm en el eje del Ebro, mientras que en la vertiente francesa la precipitación anual supera largamente los 500 mm anuales (Beguería, 2023: Figura 1.6). También existe un gran contraste en la demanda hídrica (evapotranspiración potencial), de manera que al norte de la cordillera predominan valores positivos del balance hídrico (mayor precipitación que demanda) mientras que en la vertiente sur, y sobre todo en la Depresión del Ebro, el balance es claramente negativo llegando a alcanzar valores de climas de tipo semiárido. Todo eso acompañado de temperaturas elevadas entre mayo y octubre, explica por un lado, la baja productividad de los cultivos de secano y, por otro, la reivindicación casi secular para transformar los campos de secano en regadío.

5.2 Retos del cambio climático para la agricultura de regadío y estrategias de adaptación

El cambio climático conlleva una serie de retos de gran relevancia para la agricultura de regadío, ya que, aunque en menor medida que los cultivos de secano, se trata de una actividad con una alta exposición a las variaciones climáticas. En conjunto, se prevé que los efectos negativos del cambio climático superen a los positivos. Estos efectos se han descrito en numerosas ocasiones, y aquí nos centraremos en aquellos aspectos más relacionados con los recursos hídricos. Así, se espera que el muy probable incremento de las temperaturas y la (más incierta) disminución de las precipitaciones conlleven una disminución de los recursos hídricos disponibles debido a la reducción de los caudales circulantes y de la recarga de acuíferos. Estos cambios, además, irán ligados a una variación en la estacionalidad de los recursos, puesto que se prevé un aumento de las precipitaciones líquidas en invierno en detrimento de la acumulación de nieve, una fusión menor y adelantada de la fusión del manto nivoso, y unos estiajes más largos y pronunciados.

El informe de base física del proyecto PIRAGUA proporciona información sobre las tendencias observadas y las proyecciones futuras de los diferentes componentes del balance hídrico de los Pirineos, incluyendo estimaciones de los cambios en caudales circulantes y en la recarga de acuíferos (Beguiría, 2023).

Se prevé que el cambio global, uno de cuyos efectos más conocidos es el cambio climático, implique una disminución de los recursos hídricos disponibles para la agricultura, unido a un incremento en las necesidades de los cultivos.

Además de los cambios en la disponibilidad de recursos hídricos, el cambio climático representará 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 demanda evapotranspirativa; (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.

Además de las consecuencias del cambio climático, no hay que olvidar otras amenazas que pueden tener un impacto similar sobre la disponibilidad de recursos hídricos. Aunque el presente trabajo se centra en los efectos del cambio climático, no debe olvidarse que la evolución de los recursos hídricos está también relacionada con las transformaciones de la cubierta vegetal, dado que la expansión de bosque y matorrales en áreas de cabecera da lugar a un mayor consumo de agua y a una mayor interceptación, lo que repercute en una menor recarga de los acuíferos y producción de escorrentía superficial.

La tendencia observada en las cabeceras de los ríos pirenaicos y en otras cuencas de montaña en España indica un descenso notable de los caudales que no se deriva exclusivamente de la evolución del clima, sino que se relaciona con el abandono de tierras de cultivo y el consiguiente crecimiento de la superficie forestada y cubierta de matorrales densos (Beguería et al., 2003; García-Ruiz y Lana-Renault, 2011; Morán-Tejeda et al., 2014). Resulta difícil prever cómo va a evolucionar la cubierta vegetal de los Pirineos en el futuro, ya que esta dependerá tanto de la evolución climática como de los cambios en los usos del suelo, así como de la cada vez menor disponibilidad de territorio para la expansión forestal. Sin embargo, es previsible que los procesos de expansión vegetal actuales prosigan en el futuro.

No hay que olvidar, sin embargo, otros problemas como los cambios en los usos del suelo o la reducción de la capacidad de embalsado por el aterramiento de los embalses, que pueden llegar a tener una magnitud similar al de los efectos del cambio climático.

Otro aspecto de gran repercusión para la gestión de los recursos hídricos en grandes sistemas de regadío es el progresivo aterramiento de los embalses debido al acarreo natural de sedimento por los ríos que los alimentan. Estos sedimentos son retenidos casi en su totalidad por las presas,

causando una lenta pero progresiva pérdida de capacidad de embalsado (Saa et al., 1995; Cobo, 2008; Batalla y Vericat, 2011; Palazón, 2016; Casamor y Calafat, 2018). Por ejemplo, para el conjunto de la cuenca del Ebro el Libro Blanco del Agua estimó una pérdida total de 271 hm³ (9% del volumen total de embalsado), con una pérdida de capacidad media anual de 0.25% del volumen inicial (MMA, 2000). Entre los grandes embalses del Pirineo central español, el embalse de Barasona había perdido en 1995 un tercio de su capacidad desde su construcción en 1932 (Navas et al., 1998; Valero-Garcés et al., 1999), con una tasa de aterramiento de entre 2 y 18 cm por año según zonas (Navas et al., 2004 y 2009). Avendaño-Salas et al. (1997) calcularon una tasa de aporte de sedimento de 3.5 toneladas por hectárea y año para este mismo embalse, que en el caso del embalse de La Sotonera ascendía a 11.21 toneladas. En el río Noguera Pallaresa, se calcula que los embalses de Camarasa, Terradets y Talarn habían perdido, en el año 2000, el 16, 62 y 19% de su capacidad inicial, respectivamente, con tasas anuales de aterramiento entre el 0,2 y el 0,95% (Casamor y Calafat, 2018). Aunque el ritmo de aterramiento de los embalses suele decrecer a medida que estos se van llenando de sedimentos, no hay que perder de vista que los embalses son recursos no renovables y con una vida finita, y que a largo plazo este problema va a acentuar la disminución de los recursos hídricos disponibles.

Las estrategias de adaptación son acciones encaminadas a reducir la vulnerabilidad del sector agrario ante la variabilidad y el cambio climático. Ejemplos de medidas de adaptación en la agricultura de regadío son la implementación de mejoras en los sistemas de riego, la utilización de fuentes alternativas en situaciones de emergencia, la utilización de variedades más tolerantes a la sequía, la modificación de los calendarios de siembra o el laboreo de conservación.

Para hacer frente a los retos planteados por el cambio climático y limitar las afecciones negativas y los riesgos para el sector agrario, resulta imprescindible plantear medidas de adaptación, tanto a nivel particular o de explotación como a

Box 5.1: Procesos participativos y la estrategia de dos direcciones

Los procesos participativos son un elemento fundamental en la toma de decisiones sobre cuestiones complejas como la adaptación al cambio climático, al facilitar el intercambio de conocimiento entre quienes deben tomar las decisiones (políticos, gestores), expertos (técnicos, científicos) y actores interesados (agricultores, organizaciones sociales). La participación de los actores sociales (los llamados stakeholders en inglés) hace posible la co-producción de soluciones compartidas y contribuye a disminuir los conflictos. En el diseño de sistemas de ayuda a la toma de decisiones, basados en la evaluación de escenarios mediante modelos cuantitativos, los procesos participativos sirven para informar a los expertos acerca de las opciones preferidas por los actores. Se trata de una estrategia conocida en el contexto de los procesos de toma de decisiones como ‘de abajo arriba’ (del inglés bottom-up). En una estrategia de abajo arriba los escenarios a evaluar se construyen a partir de las preferencias establecidas por los actores interesados. De esta manera, se parte a priori de una cartera de medidas de adaptación que cuenta con un buen nivel de aceptación entre los actores. Esta estrategia, sin embargo, se enfrenta a riesgos, pues la perspectiva de los actores puede resultar excesivamente local e ignorar aspectos a largo plazo o a gran escala que son más difíciles de tener en cuenta. Con frecuencia, las estrategias puras de abajo arriba excluyen las medidas de adaptación más disruptivas o ambiciosas, que frecuentemente suelen requerir nuevos instrumentos normativos y recursos que no están al alcance de los actores. La planificación ‘de arriba abajo’ (top-down), por otro lado, se basa exclusivamente en las medidas de adaptación propuestas por los expertos y gestores. Estos suelen tener una mejor perspectiva de los procesos globales y son más proclives a incluir opciones de adaptación innovadoras como nuevos instrumentos normativos, pero también tienen tendencia a ignorar las prioridades de los actores. Este tipo de estrategia se ha venido utilizando tradicionalmente en el ámbito de la planificación hidrológica. Actualmente, cobra cada vez más fuerza la llamada estrategia de dos direcciones o mixta (bottom-up meets top-down), que permite combinar las fortalezas de las dos metodologías. Se trata de combinar, desde los inicios del proceso, las preferencias y perspectivas de los actores y de los expertos, aun cuando en algunos puntos estos puedan llegar a ser mutuamente excluyentes. El proceso de evaluación de escenarios posterior servirá como base para alimentar el debate sobre la adopción de un conjunto de medidas de adaptación que ayude a minimizar los riesgos derivados del cambio climático.

nivel general. No existe un acuerdo general sobre la definición de adaptación al cambio climático, pero aquí nos sirve con indicar que se trata de reducir la vulnerabilidad del sector agrario ante las consecuencias del cambio climático.

El objetivo último de la adaptación es incrementar la resiliencia del sector ante el cambio climático. Es decir, ya que se espera que en el futuro las situaciones de estrés (p. ej., escasez de agua para riego) ocurran con una frecuencia cada vez mayor, el objetivo es minimizar los efectos de estos episodios y garantizar que las explotaciones puedan recuperarse después sin sufrir daños permanentes o a largo plazo.

Tanto los gestores (organismos de cuenca y gobiernos regionales) como las asociaciones de agricultores son muy conscientes de los retos que supone el cambio climático para la agricultura,

y han protagonizado diversas iniciativas para identificar prácticas sostenibles para el sector agrícola y la industria alimentaria, tanto en los Pirineos como en las regiones que dependen de ellos. Un ejemplo es el proyecto Agroclima del Gobierno de Aragón (<https://www.aragon.es/-/proyecto-agroclima>; Gobierno de Aragón, 2018).

Se trata de un ambicioso proyecto que aborda no sólo la adaptación al cambio climático sino también su mitigación en los sectores de la agricultura y la ganadería en todo el territorio de Aragón. Un elemento muy importante de este proyecto es la importancia que ha tenido la participación de todos los agentes del sector agroalimentario (Box 5.1).

5.3 El caso de estudio del sistema Riegos del Alto Aragón

5.3.1 Contexto general

La Comunidad General de Riegos del Alto Aragón (RAA), situada al pie del sector central de los Pirineos entre las provincias de Huesca y Zaragoza (España), es el sistema de regadío de mayor superficie de la Unión Europea.

La superficie regable alcanza actualmente las 135.000 hectáreas, repartidas en un territorio de unos 2.500 km² entre 200 y 425 m de altitud (Figura 5.2).

El sistema Riegos del Alto Aragón es la superficie de regadío más extensa de la Unión Europea. Se alimenta en exclusiva de caudales superficiales generados en el sector central de los Pirineos, en las cabeceras de los ríos Gállego y Cinca. Aunque el sistema se encuentra en un buen equilibrio entre oferta y demanda de agua en la actualidad, se prevé un aumento de los conflictos como consecuencia del cambio climático.

La concepción del sistema RAA se remonta a las ideas de Joaquín Costa, que cristalizaron en la ley que autorizó las grandes obras de regulación en 1915. El desarrollo del sistema tuvo lugar principalmente a lo largo del siglo XX (Figura 5.3), y todavía no se ha culminado ya que el proyecto definitivo supone un total de 174.000 ha regadas, ligadas a la construcción de nuevos embalses. Este desarrollo no hubiera sido posible sin la construcción del sistema de grandes presas y embalses en los ríos Gállego y Cinca: Ardisa (1927-1931, 5 hm³), El Grado (1969, 400 hm³), Mediano (1960, 313 hm³; 1973, 434,6 hm³), Búbal (1971, 64,3 hm³) y Lanuza (1980, 16,9 hm³); y embalses internos de regulación: La Sotonera (1935, 40 hm³; 1952, 80 hm³; 1962, 189 hm³), Torrollón (1983, 1,8 hm³), Valdabra (1982, 1,3 hm³, Las Fitas (9 hm³) y Lasesa (6 hm³). El agua almacenada se distribuye a través de más de 2.000 km de canales, siendo los más importantes el Canal del Gállego (1927), el Canal de Monegros I (1928; 1933; 1941; 1950; 1967; 1986), el Canal del Cinca (1971; 1975; 1982; 1988), y el Canal de Monegros II (1996).

Box 5.2: Sistemas de apoyo a la toma de decisiones aplicados a la adaptación al cambio climático

Un sistema de apoyo a la toma de decisiones (DSS por sus siglas en inglés) es una herramienta que permite evaluar diferentes respuestas ante un problema complejo. Un DSS es un apoyo para las personas que tienen que tomar una decisión o hacer una planificación estratégica, ya que permite recopilar información, generar opciones, y comparar distintas alternativas. Por todo ello, los DSS pueden ser herramientas muy útiles en el proceso de diseño de estrategias de adaptación al cambio climático, en el que confluyen numerosos actores con intereses muy diferentes y multitud de posibles respuestas.



Figura 5.2. Mapa del área de estudio (Sistema de explotación E14 de la Cuenca del Ebro) con la localización de los ríos principales y embalses, información sobre elevación y usos del suelo, delimitación de las zonas de cabecera y valle, y perímetro del sistema Riegos del Alto Aragón.

(Fuente: elaboración propia.)

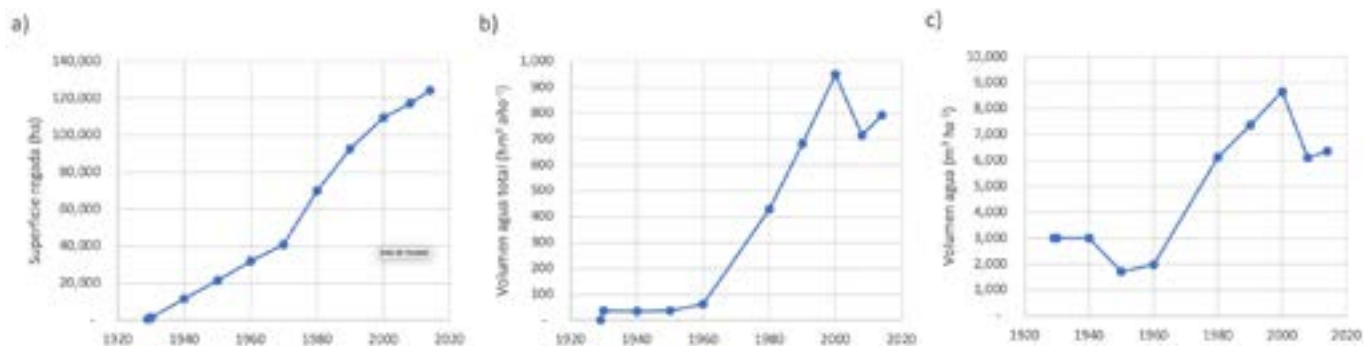


Figura 5.3. Evolución de la superficie regada (a), volumen de agua suministrado (b), y volumen de agua por unidad de superficie (c) en el sistema Riegos del Alto Aragón.

(Fuente: RAA)

Actualmente se está construyendo otro embalse de regulación interna con una capacidad para 170 hm³ (Almudévar), cuya finalización está prevista para noviembre de 2021. El volumen de agua suministrado anualmente por el sistema asciende a 792 hm³, con una dotación promedio de 6.366 m³ por hectárea. Además del suministro de agua de riego a 48 comunidades, el sistema también abastece a 113 asentamientos urbanos, 10 áreas industriales y 893 explotaciones ganaderas.

Según la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE, 2016), la demanda bruta media de agua de riego de RAA alcanza los 1.137 hm³ / año, aunque el valor medio es de 838 hm³ al año (con una dotación media de 6.717 m³ / ha), con variaciones de $\pm 15\%$ dependiendo de las condiciones anuales. Aunque la CHE ha ajustado sus operaciones de desembalses para hacer frente a la disminución de la disponibilidad de agua y la creciente demanda, la percepción general entre los regantes es que la frecuencia y la gravedad de los déficits de agua han aumentado durante los últimos años, aunque esto no se aprecia claramente en los datos de suministro.

Los sistemas de riego han cambiado sustancialmente a lo largo de la historia de RAA. El modelo inicial basado en el riego por gravedad y una agricultura de regadío casi extensiva, con bajo consumo de agua y baja rentabilidad, quedó claramente agotado a finales del siglo XX. Así, sobre todo a partir de la década de 1990 y hasta la actualidad el sistema ha experimentado una importante transformación ligada a la modernización del regadío, existiendo 97.813 ha que han sido o están en proceso de modernización. La instalación de sistemas de riego presurizado (a través de sistemas rotatorios o de aspersión) y de goteo y la concentración parcelaria han transformado profundamente el paisaje pero también los modos de gestión, destacando la necesidad de aumentar la capacidad de regulación interna mediante balsas.

También ha ocasionado, como efecto secundario, un aumento del consumo de agua (tanto por hectárea como en conjunto), y un incremento de los costes de producción por la necesidad de utilizar electricidad para bombear el agua y conseguir presión (Figura 5.3).

Con el objetivo de evaluar conjuntos de medidas de adaptación, se ha realizado una modelización basada en escenarios. Estos últimos consisten en combinaciones de proyecciones climáticas futuras y conjuntos de medidas. Las medidas seleccionadas se basan en los resultados de una reunión con los actores locales y en las recomendaciones promovidas por los gestores.

La modernización también ha conllevado cambios en los patrones de cultivo. Así, de un predominio de los cereales de invierno (antes de 1980) se ha pasado a un predominio de cultivos de verano que consumen más agua, como el maíz, el arroz y el forraje. Debido a los cambios en la Política Agraria Común y la disponibilidad de agua de riego, desde comienzos del siglo XXI el trigo y la cebada se han vuelto dominantes debido a sus menores requisitos de agua y a la posibilidad de producir dos cosechas por temporada, combinando cereales de invierno y maíz (Lecina et al., 2010; Sánchez-Chóliz y Sarasa, 2013). En gran medida, estos cultivos se destinan a la alimentación de una creciente ganadería intensiva en la región, en la que destaca por su importancia el porcino. En cambio, la presencia de cultivos hortícolas, de alto valor de mercado, no ha despuntado como hubiera cabido esperar. Esto se debe en parte a la falta de mano de obra, la escasez de empresas de transformación, y a la ausencia de mercados organizados. Destaca, no obstante, la presencia de cultivos como la endivia, el ajo y la cebolla, que están controlados por empresas de fuera de Aragón, aunque los trabajos son llevados a cabo por los propietarios del terreno.

Actualmente, se considera que el sistema se encuentra en un equilibrio satisfactorio de oferta y demanda de agua excepto en años extremadamente secos en los que debe activarse el plan de sequía que supone restricciones a los suministros de riego. Sin embargo, el cambio climático puede amenazar este equilibrio y reducir la resiliencia de las explotaciones y su viabilidad a largo plazo. El objetivo del caso de estudio consistió en desarrollar, en colaboración con los actores principales, un sistema de ayuda a la toma de decisiones (Box 5.2) para fomentar la reflexión sobre la implementación de diferentes

medidas de adaptación al cambio climático en el sistema.

5.3.2 Análisis de los recursos hídricos disponibles (presente y futuro)

El sistema RAA se enmarca dentro del sistema de explotación E14 de la Confederación Hidrográfica del Ebro (Figura 5.2). Este sistema se puede dividir en dos regiones claramente diferenciadas: una que llamaremos de cabecera al norte, enmarcada de lleno en los Pirineos centrales, y otra al sur que denominaremos el valle. Existen importantes diferencias entre ambas zonas, tanto en cuanto a la elevación (500-3304 m la cabecera frente a 200-500 m el valle); clima (excedentario en recursos hídricos en la cabecera y seco en el valle); y usos del suelo (bosques y pastos en la cabecera frente a predominio agrícola en el valle).

La mayor parte de los caudales aprovechados en el sistema E14 se genera en la cabecera, con

muy poca contribución de las cuencas medias y bajas en el área del valle. Para el período de 1980 a 2006, la aportación anual promedio del río Gállego al embalse de La Peña fue de 907,6 hm³, y la aportación anual promedio del río Cinca a los embalses de Mediano y El Grado fue de 1127.6 hm³. La casi totalidad de las demandas del sistema E14 se satisfacen con recursos superficiales, no existiendo prácticamente aprovechamiento de aguas subterráneas (un 0,9% según datos de la CHE).

Se espera que los recursos disponibles para el regadío se verán progresivamente reducidos a lo largo del siglo XXI, con porcentajes promedio que varían entre el 7 y el 20% según el escenario y el horizonte temporal considerados.

Analizando las tendencias del clima entre 1970 y 2015, el aumento de la temperatura es el cambio más evidente (Tabla 5.2). El registro muestra incrementos similares en la cabecera y el valle de cerca 0,6 °C por década en el caso de

Tabla 5.2. 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 indican significación estadística a un nivel $\alpha = 0.05$. (Fuente: Haro-Monteagudo et al., 2020.)

	Cabecera			valle			Entrada embalses		
	Precip.	T e m p . Max.	T e m p . Min.	Precip.	T e m p . Max.	T e m p . 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

Box 5.3: Análisis de vulnerabilidad basado en escenarios

El enfoque metodológico utilizado en el caso de estudio del sistema de Riegos del Alto Aragón se basa en la modelización, mediante un software de simulación, de los recursos hídricos del sistema y su gestión optimizada para satisfacer las demandas existentes. Se utilizó el modelo SWAT (Soil And Water Tool; Gassman et al., 2007) para modelizar el ciclo hidrológico en las áreas de cabecera del Gállego (hasta la presa de Ardisa) y el Cinca (hasta El Grado). El modelo hidrológico se calibró utilizando datos de clima, usos del suelo y caudales actuales, y una vez calibrado se utilizó un conjunto de proyecciones climáticas para el siglo XX (AEMET, 2017) como forzamientos. Esto permitió crear un conjunto de proyecciones futuras de caudal, bajo dos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP4.5, escenario intermedio con descenso de las emisiones a partir de 2040; y RCP8.5, escenario extremo con incremento constante de las emisiones).

En paralelo a la modelización hidrológica, se utilizó el mismo caudal mensual y el almacenamiento en embalses actual 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 a todas las demandas existentes en el sistema. En las simulaciones de gestión se incorporó el nuevo embalse de Almodévar, cuya finalización está prevista para noviembre de 2021. En combinación con los resultados anteriores de caudal circulante, se calculó la asignación de agua a las diferentes demandas del sistema en el futuro, para diferentes escenarios climáticos.

Además de los escenarios climáticos, el sistema permite incorporar el efecto de diferentes medidas de adaptación. Para el desarrollo de los escenarios de medidas se utilizó un enfoque en dos direcciones (ver Box 1), incorporando la participación de los actores implicados (regantes, técnicos de la cuenca, y técnicos del Gobierno de Aragón). Este enfoque permitió la selección de un conjunto de medidas de adaptación consideradas más relevantes, que fue posteriormente evaluada mediante el sistema de modelización.

las mínimas y 0,4 °C 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 en el área de cabecera, mientras que noviembre muestra un cambio positivo. En conjunto, pues, se puede decir que la precipitación no ha variado durante el periodo.

La estacionalidad de las aportaciones a los embalses se verá muy alterada, con un incremento de los aportes invernales y una prolongación y acentuación de los estiajes.

Con respecto a los caudales de los ríos, 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). Las aportaciones

a la salida de la cabecera del río Gállego en La Peña también han registrado descensos a nivel mensual y anual, aunque no tan pronunciados. 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 períodos no fueron significativos.

La utilización de un modelo de simulación hidrológica alimentado con diferentes proyecciones del clima futuro (Box 5.3) permite obtener simulaciones de los cambios esperables en los caudales en la cabecera del sistema 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 5.4). Así, los caudales de entrada a los embalses muestran una tendencia general a aumentar durante el invierno y disminuir entre la primavera y el verano. Esto representa una acentuación de los cambios que ya se han

observado en las últimas décadas debido a la ocurrencia de cada vez más frecuente de periodos de temperaturas benignas que favorecen la fusión nival durante el invierno, mientras que esta fusión temprana reduce las aportaciones de finales de primavera y comienzo del verano. Las diferencias se incrementan a lo largo del siglo XXI, existiendo pocas discrepancias entre los dos escenarios de emisiones. A nivel anual y considerando el escenario RCP 4.5, los descensos de las aportaciones 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. Estos valores se exageran hacia finales de siglo para el escenario RCP 8.5.

De manera individualizada, los cambios en los caudales de entrada al embalse de Lanuza son más pronunciados que para los embalses de La Peña y El Grado. Esto puede deberse a que la cuenca que fluye hacia Lanuza experimenta una disminución muy importante de la retención nival debido al aumento de la temperatura. Este efecto se amortigua en los otros dos embalses debido al mayor tamaño de sus cuencas que relativiza la importancia de la nieve, y a la existencia de

regulación aguas arriba.

Estos resultados son consistentes con otros estudios de cambios en los caudales de los ríos debido al cambio climático en el Pirineo Central, que informaron de reducciones en esta región del 10 al 20% para 2041-2070 y próximas al 35% para finales del siglo XXI (López-Moreno et al., 2014; Manzano, 2009; Candela et al., 2012; Caballero et al., 2007). Además, la consideración de proyecciones climáticas más recientes en el presente estudio muestra que las variaciones podrían ser mayores de lo previsto inicialmente, con disminuciones máximas de casi el 35% para 2041-2070, y del 40% para 2071-2100, para los escenarios climáticos más extremos. También hay que tener en cuenta 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. Varios estudios han mostrado que, en la segunda mitad del siglo XX, los cambios de vegetación ligados al abandono de actividades agropecuarias y a la reforestación han sido un agente clave en el descenso de los caudales de los ríos pirenaicos (García-Ruiz et al., 2001, 2011; Beguería et al., 2003; López-Moreno,

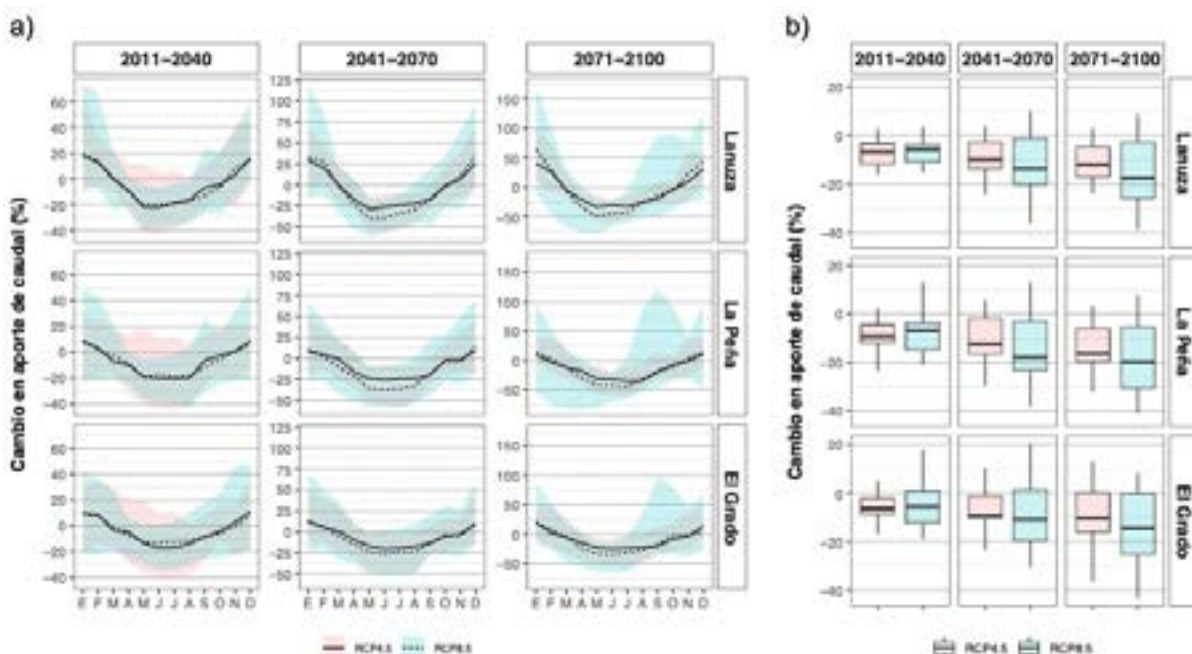


Figura 5.4. Cambio en los aportes mensuales (a) y anuales (b) a los embalses de Lanuza, La Peña y El Grado (porcentaje con respecto al periodo 1961-2010), para los horizontes 2011-2040, 2041-2070, y 2071-2100. Resultados de la simulación con el modelo SWAT forzado con seis proyecciones climáticas (AEMET, 2018) en dos escenarios de emisiones (RCP 4.5 y RCP 8.5). Las áreas de color en a) indican la envolvente de las seis proyecciones, 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.

(Fuente: elaboración propia.)

2005; López-Moreno et al., 2006). De proseguir estos cambios en el futuro, esto también podría acentuar aún más el descenso previsto de los caudales.

5.3.3 Modelización de los recursos hídricos bajo escenarios de cambio climático y medidas de adaptación

Para la modelización de la gestión de los recursos hídricos en el conjunto del sistema bajo diferentes proyecciones de cambio climático y diferentes medidas de adaptación se diseñó un sistema de simulación en cascada (Box 5.3). El sistema se calibró con datos observados durante años recientes y mostró excelentes capacidades predictivas. La modelización del ciclo hidrológico en la cabecera de los ríos Gállego y Cinca proporcionó proyecciones de aportación a los principales embalses del sistema, que luego se utilizaron para alimentar a un módulo de gestión de recursos hídricos enfocado a optimizar la satisfacción de las demandas establecidas en el Plan de Cuenca.

Además de incorporar las proyecciones de cambio climático, el sistema permite simular la gestión de los recursos hídricos bajo distintos escenarios de gestión, como la construcción de nuevas infraestructuras de regulación, superficies regadas, o cambios en la dotación de riego. Para la creación de un portafolio de medidas de adaptación se siguió una estrategia de doble dirección (Box 5.1). Durante un taller participativo con participación de representantes de los principales actores del sistema RAA se estableció por consenso un conjunto de medidas de adaptación para centrar la discusión (Box 5.4 y Tabla 5.3). La votación posterior permitió establecer las prioridades de los actores, evidenciando una fuerte preferencia por las medidas de mejora de la oferta de agua (incremento de la regulación hídrica en la cabecera de la cuenca, O1, y de la regulación interna, O2) y de aumento de la eficiencia de los sistemas de riego (E1 y E2) (Figura 5.5, Box 5.3). Las medidas orientadas

a reducir la demanda de agua de riego o a la utilización de fuentes alternativas obtuvieron, en cambio, una baja priorización.

A partir de los resultados del proceso de participación se decidió realizar tres conjuntos de simulaciones. En primer lugar se evaluó la sostenibilidad del sistema en la actualidad y con los escenarios climáticos futuros, tanto bajo la situación actual como incluyendo las nuevas infraestructuras hidráulicas planteadas en el Plan Hidrológico de la Cuenca del Ebro (CITA). En su máximo desarrollo, esto implicaría la puesta en regadío de 35.000 nuevas hectáreas, ligado a la construcción de nuevos embalses. Esta simulación permite evaluar la sostenibilidad del sistema tras el desarrollo de nuevas infraestructuras de regulación que representan una demanda histórica de los regantes, aunque como se ha indicado anteriormente es muy poco probable que estas obras se lleven a cabo en el horizonte temporal que considera este estudio.

En segundo lugar se realizaron simulaciones manteniendo las infraestructuras de regulación actuales pero variando la capacidad de regulación interna mediante balsas en distintos sectores del sistema RAA. En este conjunto de simulaciones no se consideraron cambios en los sistemas de riego, prácticas de cultivo o en la dotación de agua por hectárea.

Se desarrolló un modelo de simulación de los recursos hídricos en el sistema E14 capaz de simular el funcionamiento del sistema bajo distintas proyecciones de clima futuro y distintos escenarios de implementación de medidas de adaptación.

Por último, se realizó un conjunto de simulaciones en el que, además de la ampliación de la regulación interna, se consideraba la puesta en práctica de diversas estrategias de ahorro de agua. Según el proyecto Agroclima (Gobierno de Aragón, 2018), la implementación de medidas de tipo agronómico puede suponer una reducción de las necesidades de riego. Este tipo

Box 5.4: Proceso participativo para la selección de medidas de adaptación

Durante el invierno de 2019 se llevó a cabo un taller participativo en la sede de RAA en Huesca, incluyendo a representantes de actores relevantes del sistema: asociaciones de regantes (16 participantes), técnicos de la Confederación del Ebro (2) técnicos del gobierno regional (3), e investigadores y expertos de la zona (4). Durante el taller se discutieron diferentes medidas de adaptación al cambio climático para la agricultura de regadío, a partir de una selección de medidas extraídas de diferentes planes de adaptación (OECC, 2006; DGA, 2018a; DGA, 2018b; CHE, 2016). El conjunto de medidas se redujo finalmente a 18, agrupadas en seis grupos (Tabla 3). Todas las medidas generaron un elevado consenso en cuanto a su carácter positivo para mejorar la adaptación al cambio climático. A continuación, se pidió a los participantes que priorizaran los seis bloques de medidas de mayor a menor relevancia, y posteriormente que priorizaran las medidas individuales de los cuatro bloques más relevantes de acuerdo con la votación anterior (Figura 5.5).

La medida individual con mayor número de votos (15 sobre un total posible de 25) consistió en aumentar la capacidad de regulación en el sistema E14 mediante la construcción de nuevas presas en los ríos Gállego y Cinca. Se trata de una reivindicación tradicional de las comunidades de regantes, aunque su implementación práctica se percibe como muy difícil debido a la fuerte oposición social debida al impacto ambiental de estas infraestructuras, entre otros motivos. El desarrollo de nuevas grandes infraestructuras hidráulicas en la actualidad requiere un amplio soporte político y recursos financieros, requisitos que no se cumplen en la actualidad según los participantes en el taller.

La segunda y tercera medidas más votadas (12 y 11 votos) se refirieron a la modernización del regadío. En particular, la culminación de la transformación del regadío tradicional por gravedad en sistemas presurizados, seguido por la incorporación de nuevas tecnologías de control y gestión del riego ('modernización 2.0'). Las dificultades principales para la implementación de estas medidas se relacionan con el elevado coste de implementación, largos periodos de amortización, y el elevado coste de la energía. Además, la modernización de los sistemas de riego siempre conduce a un mayor uso del agua, aunque esto represente una contradicción. Esto se debe a que, para incrementar los beneficios y amortizar la inversión de la modernización, el agricultor debe incorporar nuevos cultivos que consumen más agua que los tradicionales cereales de invierno.

La cuarta medida (10 votos) se enfoca de nuevo en la ampliación de la capacidad de regulación hídrica, pero en este caso mediante la construcción de nuevos embalses de tamaño mediano y pequeño dentro del perímetro de RAA (regulación interna). Estos embalses o balsas se utilizan para garantizar el suministro durante los momentos de más intensidad de riego, y también para garantizar una presión adecuada para los sistemas de riego modernos. En la actualidad existen 98 balsas de regulación interna en RAA con un volumen total de 30 hm³, lo que representa el 3,5% de la demanda total anual del sistema (Jlassi et al., 2016; Riegos del Alto Aragón, 2018).

Las medidas de tipo agronómico como la introducción de nuevos cultivos o la modificación de los calendarios de cultivos, y de tipo financiero, obtuvieron menos del 30% de los votos. Aunque la utilización de cultivos y variedades con menores requerimientos de riego o adaptadas a la sequía se percibió como una posible solución ante una previsible escasez de recursos hídricos, en general los regantes desestimaron esta medida de adaptación por el temor de que conlleve una reducción de las cosechas o que los productos alcancen precios más bajos en el mercado.

de medidas equivalentes, en la práctica y de cara a la simulación, a reducir la dotación de agua de riego por hectárea, una medida mal considerada por los regantes pero que conviene considerar en el ámbito de la modelización para conocer sus

efectos sobre la sostenibilidad del sistema.

Tabla 5.3. Selección de medidas de adaptación al cambio climático para la agricultura de regadío.

Grupo O: Gestión de la oferta de agua		Grupo A: Medidas agronómicas	
O1	Aumentar la capacidad de regulación en el sistema E14	A1	Cambio de calendarios de cultivo para reducir las necesidades de riego
O2	Aumentar la capacidad de regulación interna	A2	Mejoras en la comercialización de los productos
O3	Uso de recursos hídricos alternativos	A3	Nuevos cultivos / variedades con menores necesidades hídricas
Grupo E: Mejora de la eficiencia del riego		Grupo F: Instrumentos financieros	
E1	Modernización del regadío	F1	Herramientas de financiación
E2	Modernización 2.0 (tecnologías de la información)	F2	Mejoras en el seguro agrario
E3	Concentración parcelaria	F3	Pagos por servicios ecosistémicos
Grupo G: Medidas de gobernanza		Grupo C: Sociedad del conocimiento	
G1	Participación a nivel de asociación de regantes	C1	Mejora de la formación a agricultores y gestores
G2	Participación a nivel de cuenca	C2	Mejora de la toma de datos de uso del agua
G3	Transparencia en datos y toma de decisiones	C3	Desarrollo de sistemas de alerta temprana y seguimiento

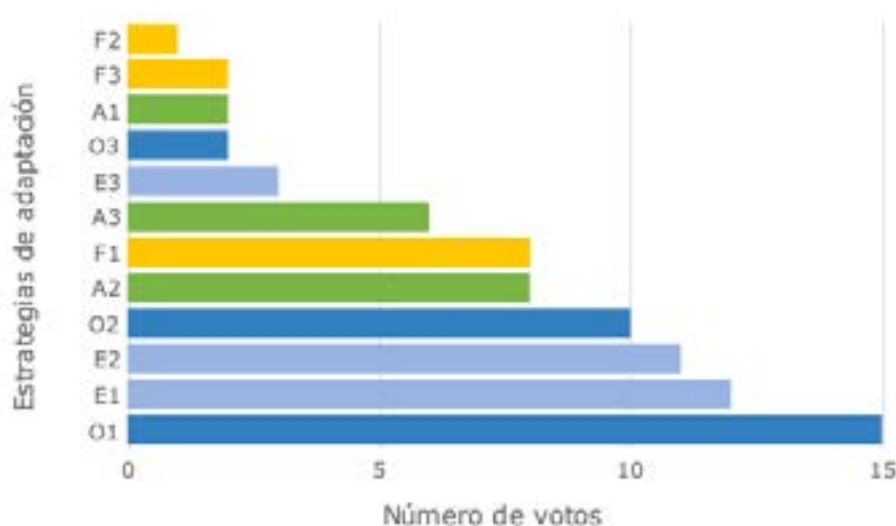


Figura 5.5. Priorización de medidas de adaptación durante la reunión con actores.

(Fuente: elaboración propia.)

5.3.4 Resultados

Los cambios en la aportación de caudal bajo escenarios de cambio climático que hemos visto anteriormente (Figura 5.4) se trasladan de forma directa a la sostenibilidad del sistema. Así, la sostenibilidad del sistema E14 y en particular la satisfacción de las demandas de riego del sistema RAA disminuyen a lo largo del siglo XXI, en

relación directa con la disminución de los aportes de caudal a los grandes embalses de regulación de la cuenca. La construcción de nuevas obras de regulación planteadas en el Plan de Cuenca, asociadas a la puesta en regadío de nuevas superficies, no mejora la situación.

Los escenarios considerando sólo la construcción de nuevas infraestructuras se describen en el trabajo publicado por Haro-Monteagudo et al. (2020). Debido a las dificultades mencionadas para el desarrollo futuro de nuevas grandes

infraestructuras, el resto de simulaciones se realizaron bajo el supuesto del mantenimiento de las obras existentes en la actualidad.

La satisfacción de las demandas de riego del sistema RAA se verá progresivamente comprometida a lo largo del siglo XXI, así como los caudales de los ríos Gállego y Cinca aguas abajo del sistema.

La regulación interna tiene un efecto muy importante sobre el sistema. En la Figura 5.6 se muestra, para el clima actual y para tres horizontes a lo largo del siglo XXI, los cambios esperables en diversos indicadores del sistema en función del volumen de regulación interna, expresado en porcentaje sobre la demanda anual real. En primer lugar, se muestra un indicador

global de sostenibilidad, que se sitúa en la actualidad en un valor de 0.77. El valor de este indicador oscila entre cero y uno, indicando respectivamente una capacidad nula y perfecta para satisfacer las demandas del sistema a lo largo del periodo simulado. El número de meses con restricciones a lo largo de cada periodo de 30 años, según los criterios del plan de sequías de la cuenca del Ebro (CHE, 2018), se muestra como segundo indicador. El tercer indicador muestra el tamaño medio de las restricciones, es decir el porcentaje de la demanda de agua que no se puede satisfacer. En conjunto, estos tres indicadores indican que existe una capacidad limitada de incrementar la regulación interna en la actualidad, pues a partir de valores relativamente bajos (en torno al 5%) todos los indicadores empeoran. Conviene recordar que la capacidad alcanza ya el 3,2% en la actualidad (este valor se marca a modo de referencia con una línea vertical en la figura).

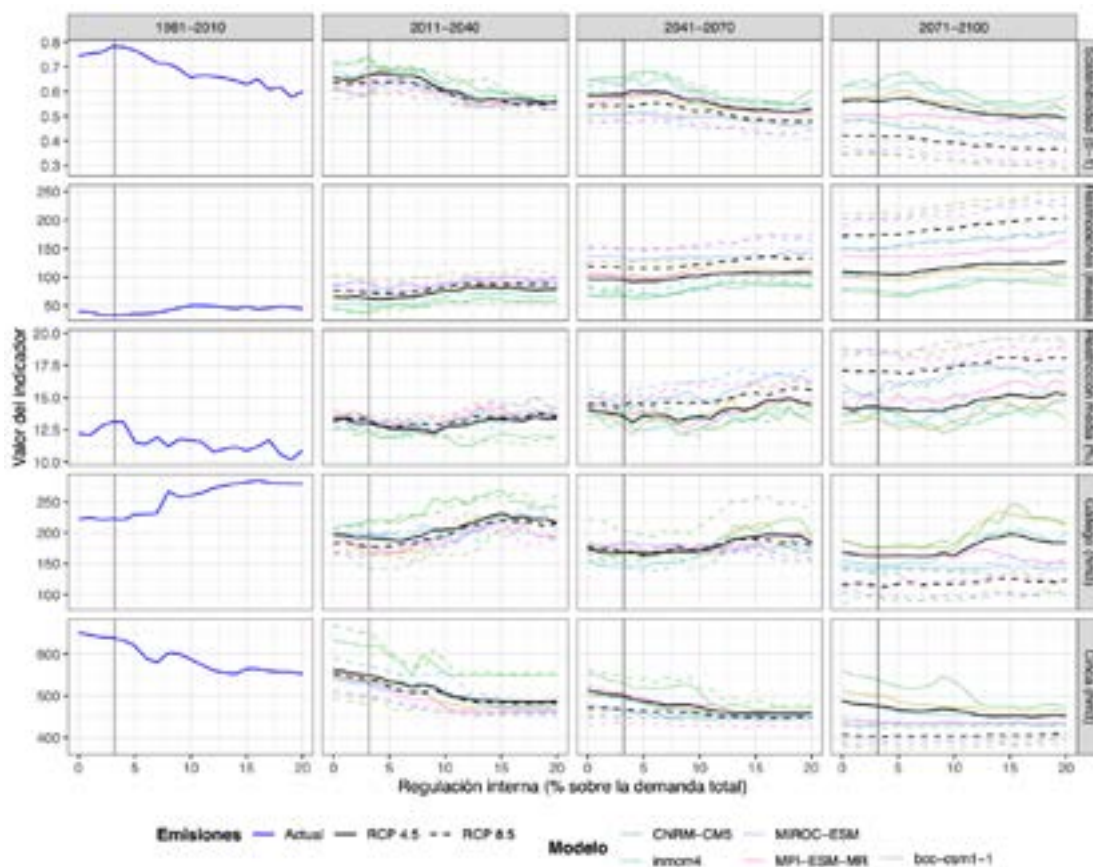


Figura 5.6. Indicadores de sostenibilidad para el conjunto del sistema RAA en función de la capacidad de regulación interna, en el presente y en tres horizontes temporales futuros: índice de sostenibilidad global, número de meses con restricciones de riego de acuerdo con el plan de sequía actual, intensidad de las restricciones (% de demanda no cubierta), y caudales ecológicos en los ríos Gállego y Cinca. La capacidad instalada actual se representa mediante una línea gris vertical.

(Fuente: elaboración propia.)

El aumento de la regulación interna tiene muy poca capacidad para contrarrestar los efectos del cambio climático. En ausencia de nuevas infraestructuras de regulación en la cuenca (embalses), solo las medidas de ahorro de agua en el regadío permitirán mantener el nivel de sostenibilidad que tiene el sistema en la actualidad.

Con respecto a los horizontes futuros, los tres indicadores tienden a empeorar a medida que avanza el siglo XXI. Las diferencias entre los dos escenarios de emisiones (RCP 4.5 y 8.5) son escasas en el horizonte 2011-2040, pero se incrementan en los horizontes de medio siglo y final de siglo. Es decir, el efecto de las balsas de regulación interna resulta insuficiente para mantener los valores de los indicadores de sostenibilidad del sistema al mismo nivel que el actual, especialmente en el largo plazo.

De manera adicional, la Figura 5.6 muestra los

caudales circulantes en los ríos Gállego y Cinca aguas abajo de las captaciones que alimentan el sistema (caudales ecológicos). Estos también se verán notablemente reducidos en el futuro, con la consiguiente amenaza a la sostenibilidad de otros usos aguas abajo.

Todos estos resultados muestran que el sistema de gestión E14 se enfrenta a desafíos importantes a medio y largo plazo si las proyecciones de cambio climático se cumplen. Esto se aprecia mejor en la Figura 5.7, en la que se muestran de forma individualizada los principales sectores en los que se divide el sistema de RAA. La figura muestra, para cada escenario climático, el valor óptimo de regulación interna que permitiría mantener niveles de sostenibilidad lo más próximos a los de la actualidad. El volumen de regulación actual se muestra mediante líneas horizontales, y varía entre unas zonas y otras. A pesar de las diferencias en función del

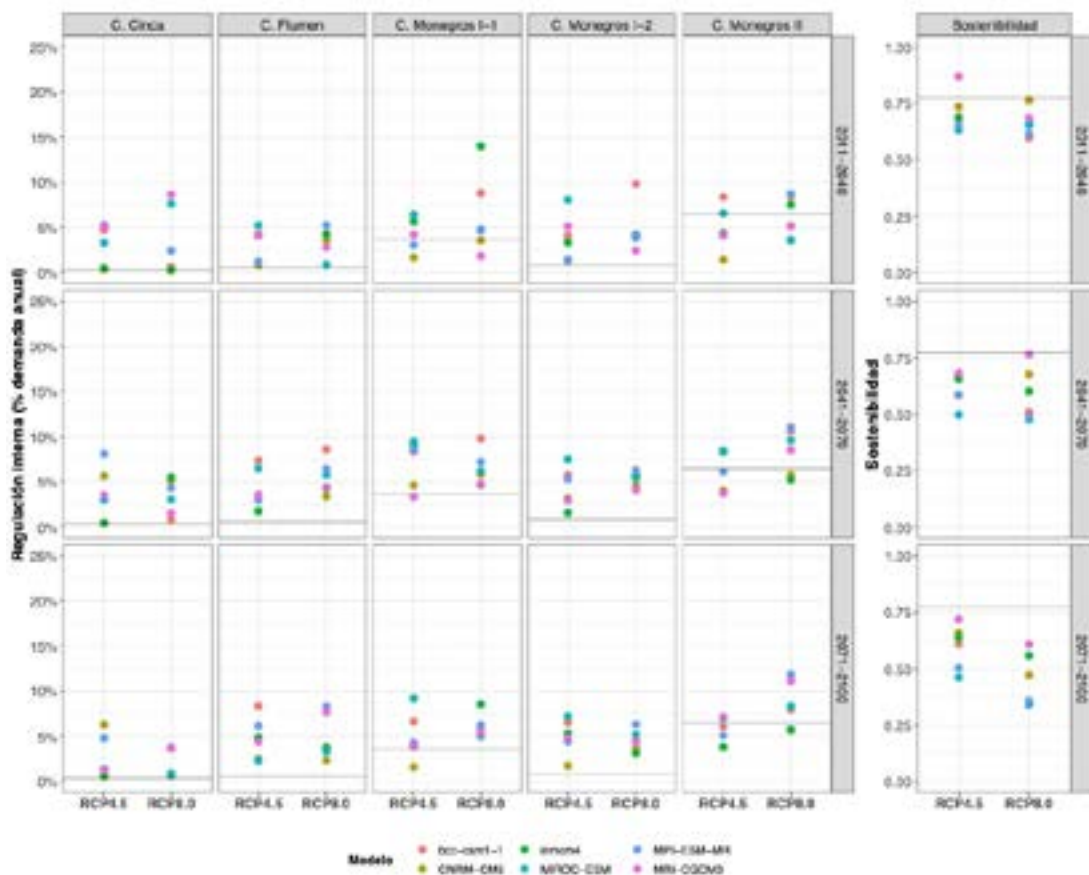


Figura 5.7. Sostenibilidad futura del sistema RAA mediante la optimización del volumen de regulación interna. Los diferentes puntos representan, para cada sector del sistema RAA y escenario climático, el volumen óptimo de reserva interna (paneles de la parte izquierda) que se requiere para mantener o acercarse lo más posible al nivel de sostenibilidad actual del sistema (panel de la derecha). Las líneas horizontales indican el volumen de regulación interna y la sostenibilidad actuales.

(Fuente: elaboración propia.)

modelo climático utilizado, en general se aprecia un escaso margen para la ampliación de la regulación interna. Sectores como el Canal de Monegros I-1 y Canal de Monegros II presentan en la actualidad un volumen de regulación que se sitúa aproximadamente en el centro de los diversos escenarios climáticos, indicando que han alcanzado un valor óptimo. En el resto de sectores existe todavía margen de ampliación de la regulación, ya que el volumen actual se encuentra por debajo de los valores óptimos según los diferentes escenarios climáticos.

Este tipo de obras tendría que estar ligado a la finalización de los programas de modernización del regadío, para que toda la superficie regable se pueda beneficiar.

A pesar de la optimización del volumen de regulación interna, los valores de sostenibilidad se sitúan en casi todos los escenarios climáticos por debajo del valor de sostenibilidad actual.

La diferencia no es muy grande en el horizonte temporal cercano (2011-2040), pero se acentúa hacia mediados y finales de siglo donde no son raros los escenarios con valores de sostenibilidad de 0.5.

El conjunto de simulaciones mostradas hasta este punto se basa en el sostenimiento de las demandas hídricas actuales, y en particular de la dotación de agua de riego por hectárea. El último conjunto de simulaciones incorporó una reducción progresiva de la dotación, aplicada al conjunto del sistema RAA. Esta simulación permite evaluar el efecto de la implementación de medidas de adaptación que conlleven un ahorro en las necesidades de riego. Alternativamente, se podría lograr el mismo ahorro de necesidades hídricas mediante la puesta en barbecho o el cultivo en secano de una parte proporcional de la superficie de regadío disponible.

Los resultados de esta simulación se resumen

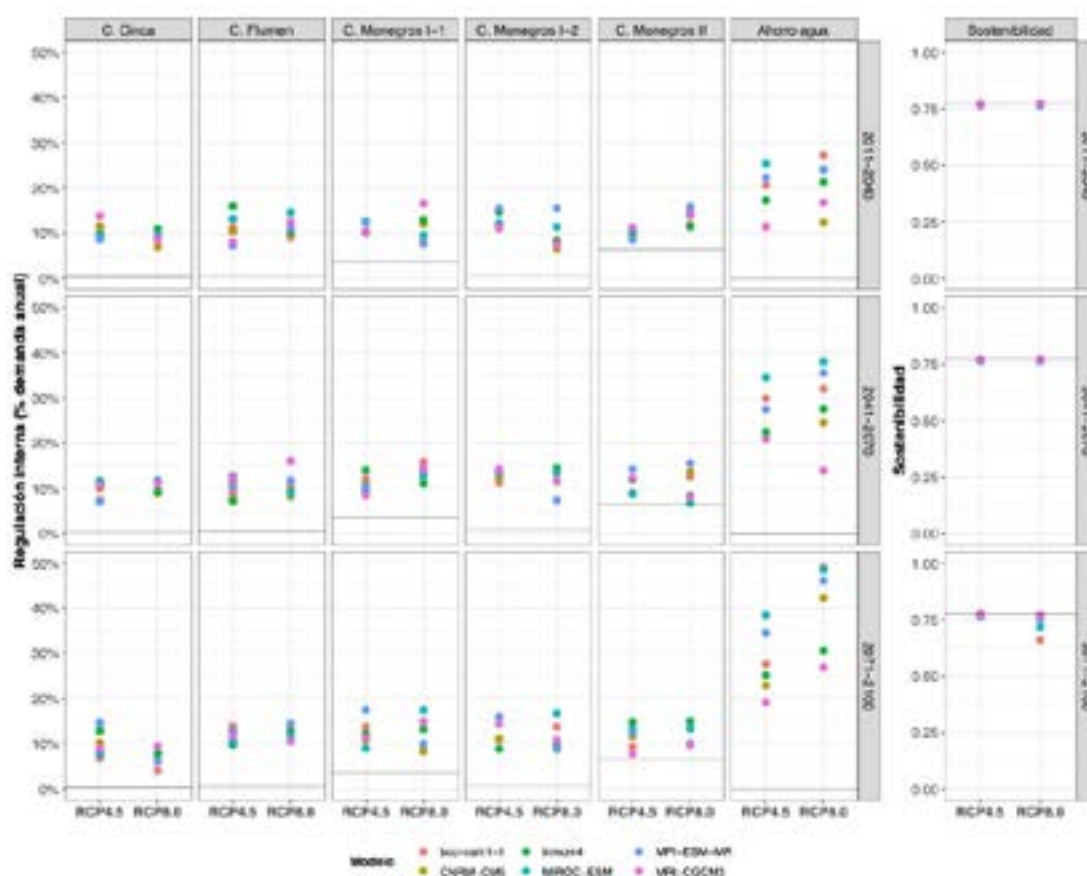


Figura 5.8. Sostenibilidad futura del sistema RAA mediante la optimización conjunta del volumen de regulación interna y la disminución en la dotación de agua de riego por hectárea. Los diferentes puntos representan, para cada sector del sistema RAA y escenario climático, el volumen óptimo de reserva interna y de ahorro de agua necesarios para mantener o acercarse lo más posible al nivel de sostenibilidad actual del sistema. Las líneas horizontales indican el volumen de regulación interna, ahorro de agua y sostenibilidad actuales.

(Fuente: elaboración propia.)

Box 5.5: Tratamiento de la incertidumbre

Las proyecciones de cambio climático que se han utilizado en este trabajo son estimaciones del funcionamiento futuro de la atmósfera en condiciones de mayor concentración de gases de efecto invernadero. Debido a la complejidad del funcionamiento del sistema climático, a nuestro conocimiento imperfecto del mismo, y a limitaciones de los computadores actuales, estas proyecciones tienen un cierto nivel de incertidumbre, que es desconocido a priori. En parte, esta incertidumbre se refleja en las diferencias que presentan entre sí las simulaciones con diferentes modelos climáticos realizadas por distintos centros de investigación a lo largo del planeta. En este trabajo, el análisis de la incertidumbre se ha abordado mediante la utilización de seis simulaciones de modelos climáticos diferentes. En la exposición de resultados, por tanto, no se ofrece un único valor sino un rango de valores plausibles, resultantes de realizar los mismos cálculos a partir de las distintas proyecciones climáticas. El rango de posibles valores se muestra en forma de bandas de color o cajas (Figura 5.4), o bien mediante líneas o puntos de diferentes colores representando los distintos modelos (Figuras 5.6, 5.7 y 5.8). El rango de dispersión de los resultados da una idea de la incertidumbre existente en las predicciones, mientras que el valor medio o mediano, también indicado en las figuras, indicaría la tendencia más probable. No hay que olvidar que existe también una componente de incertidumbre asociada al estado actual del conocimiento, ya que siempre cabe la posibilidad de que algunos procesos importantes que gobiernan el sistema climático no hayan sido tenidos en cuenta en los modelos actuales, o se hayan incorporado de manera incorrecta. Sin embargo, hay que tomar los resultados obtenidos como el resultado de la aplicación del estado actual del conocimiento científico sobre los sistemas climático e hidrológico.

en la Figura 5.8. Como en el caso anterior, se muestran, para cada proyección climática, escenarios de emisiones y horizonte temporal, los valores óptimos de regulación interna por UDA y de reducción de la dotación necesarios para mantener la sostenibilidad del sistema en un nivel lo más próximo posible a la situación actual. Los valores del índice de sostenibilidad se muestran en la parte derecha de la figura. Con respecto al escenario anterior sin reducción de la dotación, los valores óptimos de regulación interna alcanzan valores más altos, entre el 10 y el 20%. Los niveles de ahorro de agua necesarios para mantener la sostenibilidad del sistema se sitúan entre el 20% (horizonte a corto plazo), el 30% (a medio y largo plazo). En los peores escenarios, en el horizonte de finales de siglo no es posible igualar los valores de sostenibilidad actuales incluso asumiendo una fuerte restricción de uso del agua. Evidentemente, valores inferiores de reducción de la dotación conllevarían un deterioro de los indicadores de sostenibilidad hasta alcanzar los valores observados en la Figura 5.7 en la que se mantenía íntegramente la dotación actual.

5.4 Discusión y conclusiones

Las proyecciones climáticas a lo largo del siglo XXI prevén descensos de la aportación de caudal a los embalses, y un escenario de más frecuente escasez de recursos hídricos. Se discuten a continuación las principales conclusiones del caso de estudio.

5.4.1 Escasa eficacia de las soluciones centradas en el aumento de la oferta de agua (regulación)

Los resultados del taller participativo evidenciaron la pervivencia de la demanda histórica de continuar ampliando la superficie irrigada, ligada a la construcción de nuevas infraestructuras de regulación para incrementar la disponibilidad de recursos. En un trabajo anterior Haro-Monteagudo et al. (2020) demostraron que la ampliación de la zona irrigada no resulta sostenible en el largo plazo, ni siquiera asociada a la construcción de nuevos embalses.

Teniendo en cuenta la dificultad actual (social y política) de plantear nuevas infraestructuras de regulación (grandes presas y embalses), en este trabajo la simulación de medidas de adaptación para mejorar la oferta de agua se ha centrado en el incremento de la capacidad de regulación interna mediante la construcción de balsas de riego. Estos pequeños embalses privados permiten a las comunidades de regantes una mayor autonomía de gestión del riego, a la vez que aumentan la capacidad de almacenamiento de agua del sistema en su conjunto. Se trata de una opción altamente priorizada por los propios regantes, y que va ligada a la modernización del regadío, ya que las balsas son necesarias en la mayoría de los casos para garantizar la presión necesaria por los sistemas presurizados.

Los resultados muestran que la posibilidad de aumentar la capacidad de regulación interna en el sistema de Riegos del Alto Aragón es muy reducida en la mayoría de sectores. Dicho de otro modo, la capacidad de regulación interna instalada en la actualidad está cerca de los valores óptimos.

La simulación sugiere, sobre todo para los horizontes de medio y largo plazo, que aumentar el volumen de regulación por encima de los valores óptimos degradaría rápidamente la sostenibilidad del sistema al incrementar la competencia por el recurso. Bajo este escenario de mantenimiento de la demanda de agua, incluso optimizando el volumen de regulación interna, la sostenibilidad del sistema se vería afectada, lo que implicaría tener que asumir por parte de las explotaciones agrícolas un mayor número de fallos de abastecimiento en el futuro.

5.4.2 Necesidad de promover soluciones centradas en el control de la demanda de agua y el aumento de la productividad

Los resultados anteriores implican la necesidad de considerar medidas de ahorro de agua que permitan reducir el nivel de estrés en el sistema. Las simulaciones que combinan la optimización del volumen de regulación interna con la reducción de la dotación de agua de riego permiten explorar esta opción. Los resultados muestran que, para mantener los actuales niveles de sostenibilidad en el futuro, se requerirá implementar medidas que permitan reducir las necesidades de riego entre un 10 y un 30%, dependiendo de los escenarios y horizontes temporales.

Existen numerosas opciones para el ahorro del agua, como por ejemplo una utilización más racional de los sistemas de riego modernos o la adopción de cultivos y variedades con menores requerimientos hídricos. Esto resulta complicado, porque suele percibirse por parte del agricultor que conlleva una pérdida económica. La transformación de RAA se ha regido tradicionalmente por el criterio de maximizar la rentabilidad individual de las explotaciones, siendo necesario un cambio de perspectiva para enfocarse en optimizar la productividad del sistema.

En muchos casos, el problema para la introducción de nuevos cultivos está relacionado

con las posibilidades de comercialización de las cosechas. El patrón de cultivos en la actualidad está ligado al desarrollo creciente de la ganadería intensiva en la zona, que es el principal consumidor de la producción agrícola, pero esta situación podría cambiar si se dieran las condiciones (agroindustria, canales de comercialización) para otros cultivos de mayor rentabilidad económica por unidad de agua utilizada. Resulta prioritario, por tanto, enfocar los esfuerzos en cómo mejorar y revalorizar la producción agropecuaria. En este esfuerzo resulta de vital importancia que la Administración, tanto a nivel estatal como regional, aumente su implicación, con objetivos claros y verdadera vocación transformadora.

5.4.3 Insuficiencia de los enfoques de una vía (de arriba-abajo o de abajo-arriba) y valor de los sistemas de apoyo a la toma de decisiones

Los resultados del caso de estudio demuestran la necesidad de abordar la adaptación al cambio climático mediante aproximaciones complejas que incluyan distintos puntos de vista, como es el caso del enfoque de dos vías empleado en este trabajo. Ha sido necesario incluir en el porfolio de medidas de adaptación opciones que afectan al control de la demanda de agua, que en general no son favorecidas por los actores principales del sistema como quedó patente durante el taller participativo. De haber utilizado una metodología puramente de abajo-arriba habrían quedado excluidas opciones de adaptación disruptivas que no muestran una elevada preferencia entre los actores, pero que pueden ser la única opción en el futuro si se cumplen las previsiones.

El sistema basado en simulaciones y escenarios combinados de cambio climático y medidas de adaptación que se ha desarrollado en este caso de estudio es un ejemplo de metodología útil para desarrollar un sistema de ayuda a la toma de decisiones. Los resultados mostrados en este capítulo se limitan a las soluciones extremas. Por un lado, se han realizado simulaciones

manteniendo las necesidades de riego actuales, lo que conlleva un deterioro de la sostenibilidad del sistema que implicaría fallos de abastecimiento que deberían ser asumidos por las explotaciones. Por otro lado, se han realizado simulaciones asumiendo un mantenimiento de la sostenibilidad actual, a costa de que los usuarios (los regantes) asuman la necesidad de implementar medidas de ahorro de agua. Evidentemente, la solución óptima se encontrará en un término medio: el regante puede decidir qué nivel de ahorro de agua de riego puede asumir, a cambio de lograr una mayor seguridad en el abastecimiento a largo plazo. El desarrollo de un sistema interactivo que permita a los actores experimentar con todas las variables en juego y evaluar sus consecuencias en el largo plazo se muestra, así, como un elemento muy valioso para fomentar y centrar el debate sobre medidas de adaptación a las condiciones futuras.

5.4.4 Otros factores: aterramiento de los embalses, usos del suelo, usuarios aguas abajo y caudales ecológicos

Finalmente, conviene no perder de vista algunos factores que se han tenido en cuenta de manera secundaria en este trabajo, pero que tienen una gran trascendencia. Ya se mencionó en la sección introductoria que, además del cambio climático, la sostenibilidad de los recursos hídricos en los grandes sistemas de regadío se ve comprometida por la progresiva pérdida de capacidad de embalsado por aterramiento. No hemos encontrado estimaciones de la pérdida de volumen en los embalses que alimentan al sistema RAA, aparte de los valores citados para La Sotonera. Sin embargo, se puede afirmar con seguridad que el aterramiento afecta más al embalse de Mediano, por enclavarse en zona de margas, y no tanto al embalse de El Grado, porque los sedimentos transportados por el río Cinca se quedan precisamente en Mediano. Es casi seguro que el aterramiento en el Cinca representa una pérdida de unos cuantos Hm³ al año, probablemente más de lo que representa el descenso previsto de los caudales. Este problema

se viene a sumar a los efectos del cambio climático, y convendría considerarlo en futuros trabajos. Algo similar sucede con la influencia de la evolución de los usos del suelo y la vegetación en las zonas de cabecera, que tampoco se ha considerado en las simulaciones de escenarios futuros.

Aunque el caso de estudio se ha centrado en el sistema de RAA, conviene no perder de vista que este sistema no se encuentra aislado sino dentro de un sistema de gestión mucho más complejo que abarca la totalidad de la cuenca del Ebro e incluso algunas transferencias extra-cuenca. En otras palabras, existen otros usuarios aguas abajo en la cuenca que se benefician de los aportes de caudal de los ríos Gállego y Cinca tras su paso por RAA. Una explotación más intensa de los recursos de los ríos Gállego y Cinca implica, indefectiblemente, una reducción de los caudales circulantes en las partes bajas de dichos ríos (y sus afluentes, como el Flumen).

En este trabajo no se han tenido en cuenta las repercusiones de los distintos escenarios sobre los usuarios aguas abajo, pero conviene no perder de vista este aspecto.

Finalmente, conviene no olvidar la importancia de los caudales ecológicos. El mantenimiento de los ecosistemas fluviales y riparios y sus servicios ecosistémicos de regulación, depuración y refugio de la biodiversidad requieren el mantenimiento de unos caudales mínimos y lo más naturalizados posible, además de unos niveles de concentración de contaminantes dentro de lo que marca la directiva marco europea. Estos aspectos sólo se han evaluado por encima en el presente trabajo, pero es evidente que una mayor explotación de los recursos en el sistema E14 conllevará un perjuicio a los caudales ecológicos aguas debajo de las captaciones, aspectos que deberían ser evaluados y tenidos en cuenta en futuros trabajos.

6. Impactos del cambio climático en áreas de alto valor ambiental: presión turística, cambio climático y calidad ambiental en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido

Luis Javier Lambán y Jorge Jódar (IGME)

El agua constituye un elemento clave para mantener la biodiversidad en los Pirineos. Promover medidas de adaptación orientadas a garantizar su disponibilidad resulta esencial por tanto para mantener dicha biodiversidad, especialmente en zonas con figuras de protección ambiental.

Son muchas las evidencias del CC observadas en áreas protegidas del Pirineo, si bien en este proyecto nos centramos en la alteración de ciertos procesos biofísicos asociados a cambios en el ciclo hidrológico. El Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido y Parc National des Pyrénées presentan numerosas figuras de protección ambiental a escala nacional, supranacional y transfronteriza (Patrimonio Mundial de UNESCO, Diploma del Consejo de Europa a la Conservación, Reserva de la Biosfera o Carta de cooperación entre ambos Parques, entre otras). Constituyen el mayor macizo montañoso calcáreo de Europa Occidental, lo que provoca una escasez de aguas superficiales ya que buena parte de la precipitación (lluvia y nieve) se infiltra en el subsuelo (recarga) alimentando los acuíferos.

Los estudios realizados en el marco de este proyecto muestran que la cubierta de nieve va a disminuir en el futuro en todo el Pirineo, lo que supone una menor acumulación de nieve en la zona de recarga y una anticipación progresiva de la época de deshielo, lo que unido al corto tiempo de tránsito del agua subterránea debido a la naturaleza kárstica del terreno provoca una disminución en la cantidad y calidad del agua disponible, afectando tanto a los ecosistemas asociados como al turismo. Se ha modelado la dinámica de los recursos hídricos y evaluado la afección provocada por el CC y el turismo en uno de los sectores más visitados y vulnerables. Los resultados permiten evaluar los riesgos asociados al cambio climático en cuanto a la cantidad y la calidad de los recursos hídricos, así como proponer medidas de adaptación para asegurar una adecuada gestión y conservación de estos recursos. Como medidas de adaptación en relación con la cantidad se proponen: almacenamiento de la precipitación mediante aljibes o depósitos adaptados, uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas, y construcción de pozos para el mantenimiento de caudales ecológicos en los ríos durante la época de estiaje. Como medidas de adaptación respecto a la calidad se propone el control del número de visitantes y pernoctas, además de recomendaciones para la optimización en la generación y tratamiento de los residuos generados.

6.1. Introducción

Este capítulo trata sobre la influencia del cambio climático en áreas de especial valor ambiental. El agua constituye un elemento clave para mantener la biodiversidad en el Pirineo y, por tanto, promover medidas de adaptación orientadas a garantizar su disponibilidad, en cantidad y calidad, resulta esencial para mantener dicha biodiversidad, especialmente en zonas de protección ambiental.

Existen numerosas figuras de protección ambiental en el Pirineo. Las más importantes son: a) Espacios Naturales Protegidos (Parque Nacional, Parque Natural/Regional, Monumento Natural, Paisaje Protegido, Reserva y otros), b) Red Natura 2000 (Lugares de Importancia Comunitaria, Zonas de Especial Conservación y Zonas de Especial Protección para Aves) y c) Reservas de la Biosfera. En la Figura 6.1 se presentan las principales áreas protegidas, y las figuras de protección que les aplican, respectivamente, en el ámbito pirenaico.

Desarrollar la capacidad de adaptación al impacto del Cambio Climático (CC) en áreas de elevado valor ambiental es una de las principales estrategias para minimizar la afcción del CC sobre los ecosistemas y su biodiversidad.

En el Pirineo, la alta montaña es uno de los ecosistemas más sensibles al CC por su elevada proporción de especies endémicas, con poblaciones pequeñas, requisitos de hábitat elevados y limitada capacidad de dispersión. En este ambiente se han documentado abundantes evidencias de del impacto del CC (Escudero et al., 2012; Zamora et al., 2015; OPCC-CTP, 2018).

Las áreas protegidas son observatorios aventajados para el desarrollo de medidas de adaptación, ya que muchas de ellas cuentan con un historial de datos de seguimiento que permiten la detección temprana de los efectos del CC. Son espacios naturales donde aplicar soluciones, y transferir lo aprendido al resto del Pirineo. Las áreas protegidas concentran los valores naturales más relevantes del territorio, y son lugares ideales para la sensibilización de la sociedad.

Son muchas las evidencias del CC observadas en áreas protegidas del Pirineo, no obstante, en el marco de este proyecto nos centramos en la

alteración de ciertos procesos biofísicos asociados a cambios en el ciclo hidrológico.

Las zonas de alta montaña son muy sensibles a cualquier cambio en el régimen climático, con consecuencias inmediatas en aspectos del balance hídrico como la generación de escorrentía superficial, la recarga y el funcionamiento de los acuíferos. Todos ellos son elementos clave para la conservación tanto de flora y fauna singulares como de los humedales, los cuales en muchas ocasiones son producto de la descarga de aguas subterráneas. Las zonas de alta montaña se caracterizan por presentar una alta precipitación (lluvia y nieve), y por ende una elevada escorrentía. Los acuíferos existentes en estas zonas suelen presentar altas tasas de recarga, que modula la escorrentía de los sistemas hidrológicos asociados asegurando la sostenibilidad de los ecosistemas dependientes del recurso hídrico. Para poder preservar y conservar dichos ecosistemas frente a los efectos del cambio climático resulta esencial conocer las relaciones entre la cobertura de nieve y su duración y la estacionalidad del balance hídrico.

Las cuencas de alta montaña presentan características específicas asociadas a la altitud y el relieve, como la presencia de importantes gradientes altitudinales de temperatura y el efecto orográfico amplificador de las precipitaciones. Estos aspectos tienen, a su vez, consecuencias sobre la vegetación y los suelos. Además, se caracterizan por la presencia de manantiales localizados a diferentes altitudes. Tanto la recarga como la descarga de los acuíferos se encuentran frecuentemente controladas o condicionadas por la dinámica nival (Jódar et al., 2020; González-Ramón et al., 2020).

La cubierta de nieve, por lo general, impide la recarga de los acuíferos en invierno, mientras que el deshielo, durante la primavera, favorece la recarga de estos (Kuusisto 1984; van der Kamp y Maathuis, 1991; Jódar et al., 2020). Con la actual tendencia al incremento de la temperatura disminuye la precipitación en forma de nieve y se adelanta la fusión del paquete nival. Estos efectos desplazan estacionalmente los picos de escorrentía, tanto superficial como subterránea, asociados al deshielo (Veijalainen, 2008; Jódar et al., 2021) causando escasez de recursos

hídricos en aquellas zonas sin una capacidad de almacenamiento suficiente (Barnett et al., 2005).

En este marco alpino, los acuíferos someros y los kársticos son especialmente sensibles a los cambios en las condiciones climáticas dado el rápido contacto existente entre la superficie del terreno y el nivel freático, así como la rápida respuesta de estos sistemas debido a los cortos tiempos de tránsito asociados a estos acuíferos (Healy y Cook, 2002; Dingman, 2002; Lee et al., 2006). Estos cambios conllevan modificaciones en el régimen de funcionamiento hidrodinámico de las aguas subterráneas y superficiales, a la interacción entre ambas y a los ecosistemas asociados. En este sentido, estos cambios pueden tener importantes efectos sobre la distribución y la abundancia de flora y fauna (Hauer et al., 1997) y facilitar la entrada de especies invasoras.

Muchas zonas de especial valor ambiental constituyen, además, algunos de los principales destinos turísticos del Pirineo, por lo que los efectos del cambio climático no afectan solamente a la biodiversidad y los ecosistemas asociados sino, también, a uno de los principales motores económicos. La influencia del CC en el turismo asociado a zonas de especial protección ambiental está relacionada con la alteración de elementos iconográficos del paisaje Pirenaico o el incremento del riesgo en infraestructuras turísticas, daños directos a personas, instalaciones de alojamiento o infraestructuras turísticas, inundaciones repentinas o avenidas por la mayor frecuencia de precipitaciones intensas, o corrimientos y deslizamientos de tierra ligados al aumento de los ciclos de hielo y deshielo por la mayor variabilidad climática (Keiler et al., 2010; Raia et al., 2014). Sin embargo, el CC puede tener también efectos positivos en el turismo, como la extensión de la estación estival, temperaturas más suaves en primavera y otoño, o descenso de las temperaturas mínimas, lo que podría suponer un incremento de la elección de los destinos turísticos de montaña (Isoard y Prutsh, 2014).

6.2. Retos del cambio climático y el cambio global en áreas de especial valor ambiental y estrategias de adaptación

6.2.1 Retos del cambio climático en áreas de alto valor ambiental

El Cambio Global (CG) está caracterizado por los denominados impulsores o motores de cambio. Los impulsores directos se refieren a los factores o conjunto de factores de origen antropogénico que impactan sobre los procesos ecológicos esenciales de los ecosistemas, y por tanto en las funciones que definen la capacidad de éstos de generar servicios que determinan, en parte, el bienestar humano. Se consideran seis impulsores directos: los cambios de usos del suelo, el cambio climático, la contaminación de aguas, suelos y atmósfera, las especies exóticas invasoras, los cambios en los ciclos biogeoquímicos y la sobreexplotación de los componentes geóticos y bióticos de los ecosistemas. Sin embargo, estos impulsores están causados, fundamentalmente, por políticas o procesos sociopolíticos, denominados impulsores indirectos de cambio.

Uno de los principales retos frente al cambio climático y global es mantener niveles adecuados de resiliencia ecológica (Box 6.1). Por tanto, en las estrategias de adaptación al CC es muy importante tener en cuenta la variabilidad climática y el régimen natural de perturbaciones que determinan, en gran parte, la resiliencia de los ecosistemas (EUROPARC-España, 2018).

Para detener la pérdida de la biodiversidad en áreas de especial protección ambiental, las políticas de conservación deberían centrarse no sólo en minimizar los efectos o impulsores directos de cambio, sino especialmente en gestionar las causas, es decir, incidir en la administración sensata de los impulsores indirectos.

La estrategia de focalizar las políticas de conservación de la biodiversidad en crear áreas protegidas más extensas y numerosas, y en la contribución de éstas a los procesos de mitigación y adaptación del cambio climático, invisibiliza el territorio donde se encuentran. Este hecho hace que los programas de conservación se centren en los espacios protegidos y no en la gestión del

Box 6.1. Resiliencia ecológica.

La ‘resiliencia ecológica’ es a la capacidad de un sistema ecológico para recuperar sus propiedades después de verse alterado por una perturbación (Lloret, 2016).

territorio donde desarrollan sus objetivos.

Ello hace que sea más fácil y rentable políticamente declarar un área protegida nueva, que demandar una planificación integrada del territorio que analice y gestione las causas de un modelo territorial insostenible. Aunque las áreas protegidas pueden contribuir a minimizar los efectos no deseables del CC, es fundamental gestionar además sus causas, o lo que es lo mismo, los impulsores indirectos de cambio, que deberían reflejarse en transformaciones estructurales de las políticas energéticas, de infraestructuras, de transporte, financiera e industrial. Las áreas protegidas pueden jugar un papel fundamental en la coordinación y concertación para desarrollar un nuevo modelo territorial cohesionado y sostenible (EUROPARC-España, 2018).

6.2.2 Estrategias de adaptación

La adaptación al cambio climático supone un reto para los gestores de las áreas protegidas, que según EUROPARC, debe tener en cuenta los siguientes criterios generales: a) considerar la perspectiva global: los espacios protegidos son parte de redes más amplias, integrados en el territorio; b) integrar el cambio como un proceso siempre presente en los ecosistemas; c) utilizar la mejor información científica, para gestionar en un contexto de incertidumbre; d) desarrollar alianzas con agentes sociales, y tratar de implicar a más actores; y e) mejorar el apoyo social y la sensibilización sobre los efectos del cambio climático y global.

Las áreas protegidas constituyen una herramienta esencial para minimizar los efectos del CC, jugando un papel clave en los procesos de mitigación y adaptación. Respecto a los procesos de mitigación, los ecosistemas protegidos almacenan grandes cantidades de carbono en la

vegetación y en el suelo además de capturar el dióxido de carbono de la atmosfera.

Respecto a los procesos de adaptación, los ecosistemas de las áreas protegidas sostienen el clima local y reducen el riesgo de desastres ocasionados por eventos extremos.

Las estrategias de adaptación del impacto han de tener dos líneas principales de actuación en función del tipo de impacto:

Impactos directos: El efecto de estos impactos sobre los ecosistemas de las áreas de especial valor ambiental pasan por un incremento de la temperatura y una variación del recurso hídrico que afecta a su cantidad, estacionalidad y calidad. El incremento altitudinal de la temperatura provoca la migración de las especies de flora y fauna en altitud. Para facilitar esta migración se proponen desarrollar corredores ad-hoc y realizar campañas de migración selectivas para aquellas especies más vulnerables. El impacto generado por la variación de los caudales en los ríos se puede minimizar realizando una gestión integral del recurso hídrico, fomentando sobre todo la recarga de acuíferos. A este respecto, hay Soluciones Basadas en la Naturaleza para la Gestión del Agua (SbNGA), que implican procesos naturales y/o antrópicos con resultados análogos a los naturales, que pueden utilizarse para mejorar la disponibilidad de agua en cantidad y calidad, reducir los riesgos de desastres asociados a esta disponibilidad del recurso hídrico, mejorar la adaptación al CC y aumentar la resiliencia de los ecosistemas

Impactos indirectos: El efecto de estos impactos sobre los ecosistemas de las áreas de especial valor ambiental pasan por una disminución de la calidad en las aguas como resultado de un incremento de la actividad antrópica en estas zonas (Lambán et al., 2022). Las medidas para minimizar este impacto pasan por realizar un

mayor control de las actividades que se realizan, pero, sobre todo, por concienciar a las personas con respecto al grave impacto potencial que su actividad puede generar en el ecosistema.

Los ecosistemas de alta montaña presentan una elevada biodiversidad, pues en un espacio reducido coexiste una amplia variación altitudinal con una elevada heterogeneidad topográfica. Además, a menudo se encuentran poblaciones genéticamente aisladas, por lo que en ellas son más abundantes los endemismos. Uno de los efectos del cambio climático previsto en estos ecosistemas tiene que ver con el movimiento altitudinal de los nichos climáticos, con la consiguiente reducción o pérdida de las zonas bioclimáticas superiores y el ascenso en altitud de las inferiores. Esto tendrá como consecuencia la migración de las especies de flora y fauna en altitud, o bien a otras montañas más favorables. Este proceso va a estar muy condicionado por: 1) la capacidad de dispersión de las especies (frecuentemente reducida en las de alta montaña) y la conectividad del territorio; y 2) la plasticidad y capacidad de adaptación local de las especies a los cambios (Garzón et al., 2011; Escudero et al., 2012). El cambio climático también se prevé que produzca alteraciones en la fenología y los ciclos vitales de algunas especies (Stefanescu et al., 2003; Donoso et al., 2016). La desaparición de los glaciares y la reducción del periodo de permanencia de la nieve tendrá efectos sobre los hábitats más especializados en este tipo de condiciones (neveros), así como cambios en la hidrología, con una disminución del periodo de tiempo comprendido entre la precipitación y la escorrentía superficial, una disminución del flujo de base en ríos y arroyos (Price y Neville, 2003) y una modificación en la recarga a los acuíferos (Jódar et al., 2020 y 2022). Por el funcionamiento de estos ecosistemas, próximo al natural salvo en el caso de aquellos mantenidos por la actividad antrópica (Martos Rosillo et al., 2019), las opciones de intervención son reducidas y deberán enfocarse a la protección de los elementos singulares.

6.3. El caso de estudio del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido (Huesca)

6.3.1 Introducción

El Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido (PNOMP) presenta un elevado número de figuras de protección ambiental a escala nacional, supranacional y transfronteriza. El agua, en sus diferentes formas (glaciares, nieve, escorrentía superficial y subterránea, manantiales), es un elemento fundamental desde los puntos de vista paisajístico y ambiental.

El área constituye el mayor macizo montañoso calcáreo de Europa Occidental, y el karst de mayor altitud de toda Europa. La escasez de aguas superficiales durante el estiaje fuera de los cauces principales se debe a que buena parte del agua de precipitación (lluvia y nieve) se infiltra en el subsuelo (recarga) alimentando los acuíferos que, posteriormente, descargan a través de manantiales y aportan el caudal base a los ríos principales. Los acuíferos kársticos en zonas de alta montaña constituyen sistemas hidrogeológicos complejos que se caracterizan por presentar: una alta heterogeneidad, velocidades de tránsito elevadas, efectos asociados a relieves abruptos y grandes altitudes, tiempos de respuesta muy cortos a episodios de precipitación, importantes gradientes geográficos de temperatura, y una recarga y descarga controlada en buena parte por la dinámica nival. Todo ello hace que estos acuíferos sean muy vulnerables frente al cambio climático. Conocer su funcionamiento es esencial para realizar una correcta gestión y conservación.

El aumento de la temperatura como consecuencia del CC supone una menor acumulación de nieve en la zona de recarga del acuífero, y un adelantamiento progresivo de la época de deshielo, lo que, unido a los cortos tiempos de tránsito del agua debido a la naturaleza kárstica del terreno, puede afectar significativamente al mantenimiento de los niveles y caudales de descarga subterránea durante la primavera y el verano. La mayor parte de los recursos hídricos, tanto sus manantiales (algunos tan emblemáticos como la Cola de Caballo, la Fuenblanca o la Fuen de Escuaín; Figura 6.2) como sus ríos principales (Arazas, Bellós, Yaga y Cinca) tienen su origen en las aguas subterráneas, por lo que la disminución en el aporte de esta afectará

directa o indirectamente a toda la biodiversidad y ecosistemas asociados al agua.

Los escenarios climáticos futuros prevén tanto una disminución de los recursos hídricos como un aumento en su variabilidad temporal, lo que hace de este caso de estudio un área especialmente sensible dada la rápida respuesta de los sistemas kársticos. Como consecuencia se prevé una disminución del caudal de los manantiales y los cursos de agua superficiales, sobre todo en la estación cálida. Esta estación coincide además con una mayor afluencia de visitantes (en número previsiblemente creciente en el futuro) que puede generar problemas de contaminación. Estos problemas de calidad en el agua se agravarán en el futuro debido a: 1) una mayor afluencia de visitantes y una mayor carga contaminante asociada a su presencia y actividad; y 2): una menor capacidad de dilución de los contaminantes disueltos debido a la merma del recurso hídrico generada por el impacto del cambio climático.

El objetivo de este caso de estudio es evaluar los efectos del cambio climático en la cantidad y calidad de los recursos hídricos, además de conocer el grado de afección por contaminación a las aguas superficiales y subterráneas provocado por el turismo en uno de los sectores más frecuentados y vulnerables.

La evaluación de los efectos del cambio climático sobre la cantidad de los recursos hídricos se realiza a escala regional, mediante la elaboración y calibración de un modelo numérico de balance de agua en el suelo y simulación de escenarios climáticos futuros, y a escala local, en el sector comprendido entre el Macizo del Monte Perdido y la Cola de Caballo, uno de los sectores más emblemáticos y frecuentados del Parque. Para ello, se han instalado sensores de nivel de agua, conductividad eléctrica y temperatura del agua del acuífero, además de realizar e interpretar diversos ensayos con trazadores para establecer conexiones hidráulicas dentro del karst y estimar los tiempos de llegada asociados. La afección del turismo y del CC en la calidad de los recursos hídricos se establece a escala local, en este mismo sector, mediante una red de puntos de control y muestreo biológico, químico e isotópico del agua.

6.3.2 Área de estudio

El área de estudio se sitúa en el sector central del Cordillera Pirenaica. Está compuesto por un sistema de valles y cumbres enlazados, destacando las gargantas radiales que dibujan los principales cursos fluviales: Cañón de Añisclo al S, Valle de Escuaín al SE, Valle de Ordesa al O, y Valle de Pineta al OSE (Figura 6.3).

Según la clasificación de Köppen-Geiger (Peel et al., 2007), el clima es frío, con una estación seca, y veranos suaves y frescos. En la estación meteorológica de Fanlo-Góriz situada a 2200 m s.n.m., la temperatura media anual es de 4,9°C y la precipitación media de 1650 mm/año. Los meses de julio y agosto son los más cálidos y los de enero y febrero los más fríos. En general, las nevadas comienzan en noviembre y suelen durar hasta mediados de mayo (Polo, 2015). Las medias mensuales de la precipitación presentan dos máximos durante el otoño y la primavera, y tiene dos mínimos durante el invierno y el verano (Lambán et al., 2015). La variabilidad espacial de la precipitación presenta un gradiente O-E (Benito Alonso, 2006) debido a los frentes atmosféricos de baja presión que llegan desde el Atlántico. Ellos son los responsables de los principales volúmenes de precipitación (Lambán et al., 2015). Los gradientes verticales promedio de temperatura y precipitación son de -3,3°C/km y 200 mm/km, respectivamente.

Desde un punto de vista geológico, el PNOMP forma parte de un sistema imbricado de pliegues y cabalgamientos vergentes al sur. Su arquitectura estructural responde a la existencia de dos mantos de corrimiento principales: el manto de Gavarnie, al O del Río Ara, y el manto del Monte Perdido, hacia el E (Seguret, 1972). El manto de Gavarnie se observa en la parte norte, donde afloran materiales del Paleozoico y Cretácico superior. El manto del Monte Perdido comprende materiales desde el Cretácico hasta el Eoceno inferior, presentando una estructura de estratificación sub-horizontal con escasa deformación interna en la parte inferior del Valle de Ordesa. Esta escasa deformación, unida a la intercalación de formaciones menos permeables, favorece localmente la desconexión hidráulica de los



Figura 6.2. Manantiales de la Cola de Caballo (A), Fuen Blanca (B) y Fuen de Escuaín o Surgencia del Yaga (C).

niveles permeables (Figura 6.4).

El área presenta un paisaje de montaña alpina, resultado de un intenso proceso de karstificación y erosión por procesos glaciales. Los efectos de la karstificación se observan por la presencia de numerosas zonas de lapiaz, cuevas, sumideros y fisuras. Por otro lado, los procesos glaciales se reflejan en los largos y profundos valles en forma de U de Ordesa, Añisclo, Escuaín y Pineta (IGME-OAPN, 2013).

Desde un punto de vista hidrogeológico, el área pertenece a la masa de agua subterránea 09032 (Sierra Tendeñera-Monte Perdido). Las calizas, dolomías y calcarenitas del Cretácico superior e inferior y del Paleoceno-Eoceno constituyen los afloramientos permeables más importantes. En ellos se encuentran los manantiales y las zonas de descarga subterránea más significativas. Los principales sistemas kársticos están ubicados en los materiales del Paleoceno-Eoceno (CHE, 1998; Ríos-Aragüés, 2003; Lambán et al., 2015), entre los que destacan por su desarrollo los sistemas de

la Punta de las Olas, Sistema Garcés o Fuentes de Escuaín. La potencia del conjunto es de 200 a 300 m, aunque el espesor de dichas formaciones aumenta en el sector septentrional por causas tectónicas (pliegues apretados y apilamientos tectónicos), lo que permite el desarrollo de sistemas kársticos en los que se superan los 1000 m de potencia de zona vadosa (no saturada). El yacente está constituido por las facies terrígenas del Maestrichtiense, responsables de los numerosos manantiales de la red de drenaje que existen en los valles de Añisclo y Ordesa.

6.3.3 Evaluación de los efectos del cambio climático en la cantidad de los recursos hídricos

La evaluación de los efectos del CC sobre la cantidad de los recursos hídricos se realiza a

escala regional (Cuenca del Ara) y local, en el sector comprendido entre el Macizo del Monte Perdido y la Cola de Caballo, los dos puntos más emblemáticos y de mayor atractivo turístico del Parque.

La infiltración (recarga en tránsito), con 696 mm, equivale al 51% de la precipitación, lo cual es coherente con el predominio de los materiales carbonatados de naturaleza kárstica que afloran por encima de los 2000 m de altitud, donde se encuentran las principales zonas de recarga del Parque.

La precipitación muestra una ligera tendencia decreciente de en torno al 5% para el periodo 2071-2100. La temperatura muestra una tendencia creciente que se propaga de manera natural a los flujos de evapotranspiración (AET).

Para caracterizar los recursos hídricos superficiales y subterráneos a escala regional, se ha realizado un modelo hidrológico de precipitación-aportación para la cuenca del río Ara mediante la aplicación del código GIS-BALAN (Samper et al., 1999 y 2015; Pisani, 2008). El modelo hidrológico se ha calibrado con los datos de caudal del río Ara para el periodo 1980-2015 medidos en la estación de aforos

de Boltaña, perteneciente a la Confederación Hidrográfica del Ebro.

Tabla 6.1. Resultados medios anuales de las componentes del balance hidrológico en la cuenca del río Ara (1980 – 2015). Se indican además los valores de las relaciones entre la recarga (R) y la recarga en tránsito (RT) con respecto a la precipitación (P).

Precipitación total P (mm/año)	1364
Precipitación nival (mm/año)	393
Interceptación (mm/año)	160
ETR (mm/año)	482
Escorrentía superficial (mm/año)	20
Flujo hipodérmico (mm/año)	322
Recarga en tránsito RT (mm/año)	696
Recarga R (mm/año)	380
RT/P (%)	51
R/P (%)	28
Caudal total descarga (mm/año)	722

La Tabla 6.1 presenta los valores de las principales componentes del balance hidrológico obtenidas para esta cuenca.

El modelo calibrado se ha utilizado para estimar el impacto del cambio climático en la respuesta hidrológica del sistema. Se utilizan los datos de precipitación (P) y temperatura (T) de los modelos climáticos considerados en el Proyecto CLIMPY para los escenarios de emisión RCP 4.5 y RCP 8.5.

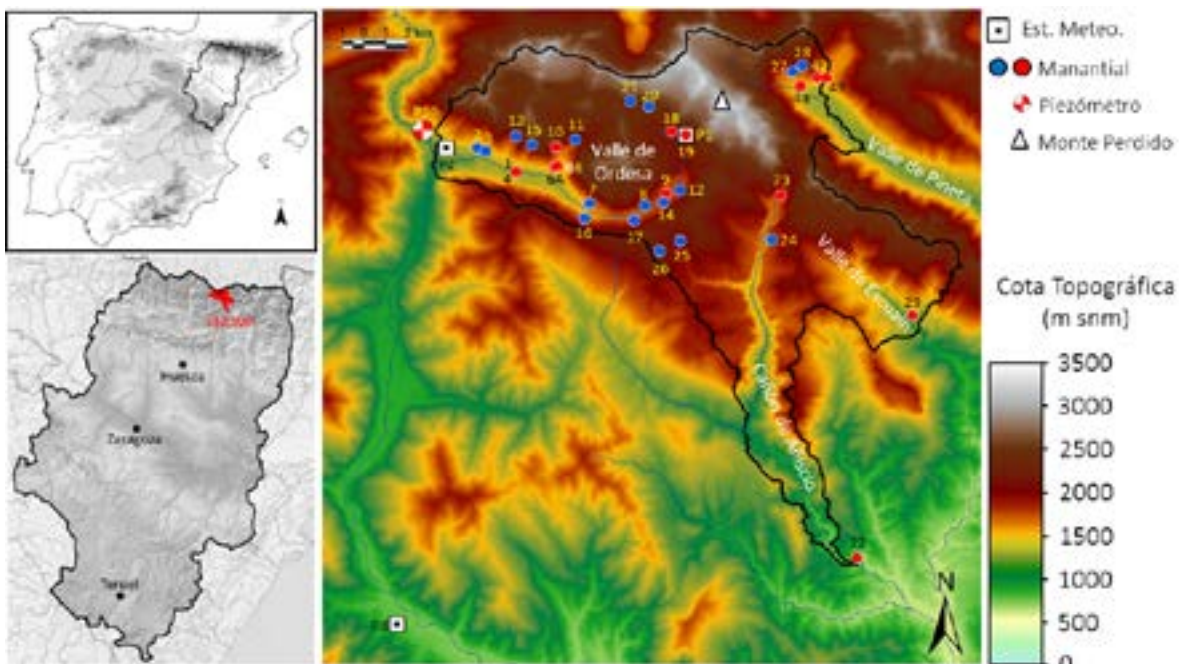


Figura 6.3. Localización del área de estudio, relieve y principales puntos de interés.

(Fuente: Jódar et. al., 2016.)

Hay un profundo cambio en la estacionalidad de los flujos, de manera que los periodos del año asociados a la fusión nival y al estiaje acusan un adelanto muy marcado en la estación, así como una extensión de su duración en el caso del estiaje.

La Figura 6.5 muestra los resultados obtenidos para las variables hidrometeorológicas principales, promediando los valores de cada variable en intervalos de 30 años. Las variables relacionadas con la descarga del sistema (escorrentía total, superficial, subsuperficial y subterránea)

presentan una tendencia similar a la de la precipitación, sin mostrar grandes variaciones, excepto en el caso de la escorrentía superficial que experimenta variaciones acusadas que en realidad no suponen una contribución o detracción muy elevada al flujo total de descarga de la cuenca, debido precisamente a la alta capacidad de infiltración que tienen los materiales que afloran en superficie.

Trasladando los porcentajes de cambio en la descarga total de la cuenca, obtenida para el último periodo de 30 años (2071-2100), en

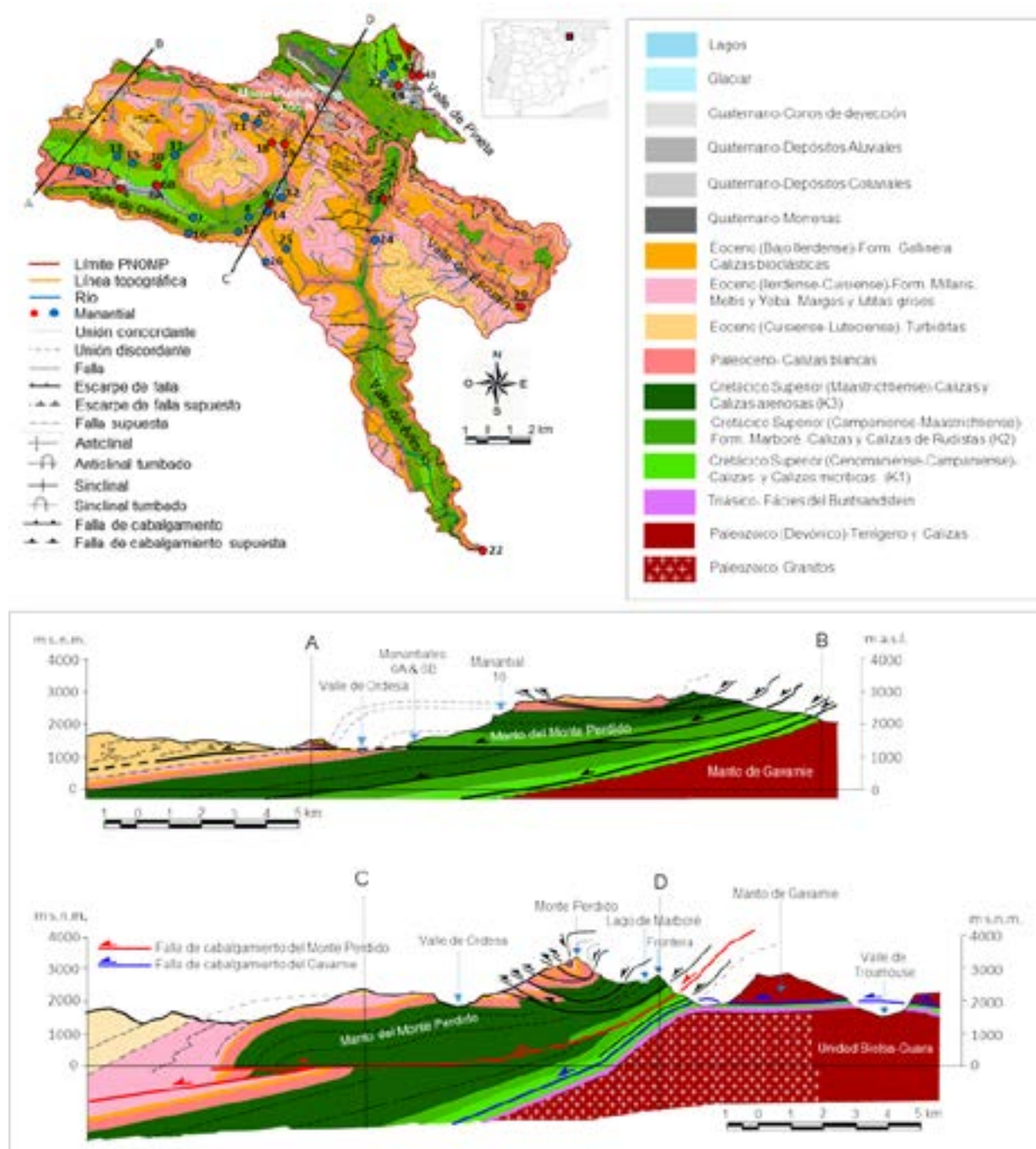


Figura 6.4. Situación, mapa geológico, y cortes geológicos.

(Fuente: modificada de Lambán et al., 2015).

variaciones de caudal se obtiene una disminución de 56 y 112 hm³/año para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, respectivamente. No obstante, el impacto del cambio climático no solo se observa en la variación del caudal de descarga de la cuenca, sino también en la estacionalidad de esta, reflejándose este cambio en la forma del hidrograma, con un comportamiento nival a pluvio-nival más acusado (Figura 6.6).

Además, los periodos asociados a la fusión nival y al estiaje acusan un adelanto muy marcado como se puede observar en la Figura 6.6, donde se aprecia claramente cómo el caudal de descarga en invierno aumenta debido a que hay un aumento en las precipitaciones en forma de lluvia, y de manera análoga, un caudal menor en la época de deshielo, ya que en invierno se produce una menor acumulación de nieve, y por ende un menor volumen de agua de fusión nival para contribuir al caudal total de descarga de la cuenca en primavera.

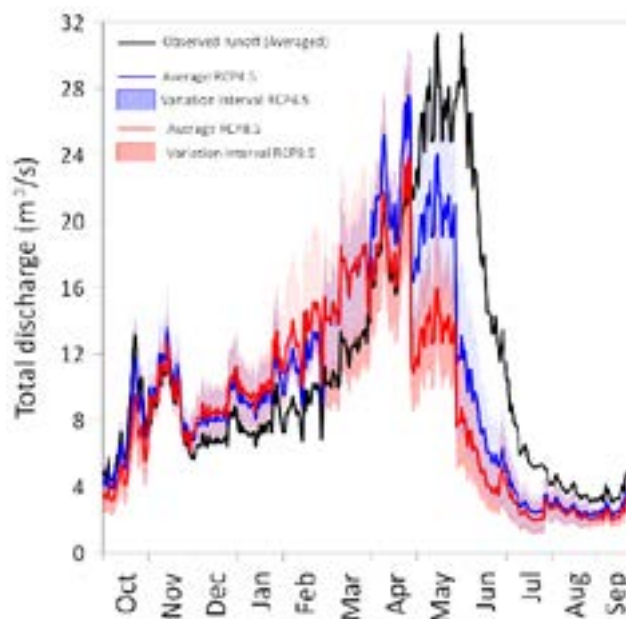


Figura 6.6. Variación estacional de la descarga total del río Ara, para el periodo de control (1961-2005) como para el periodo 2071-2100 teniendo en cuenta los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 simulados por los diferentes modelos climáticos.

(Fuente: elaboración propia.)

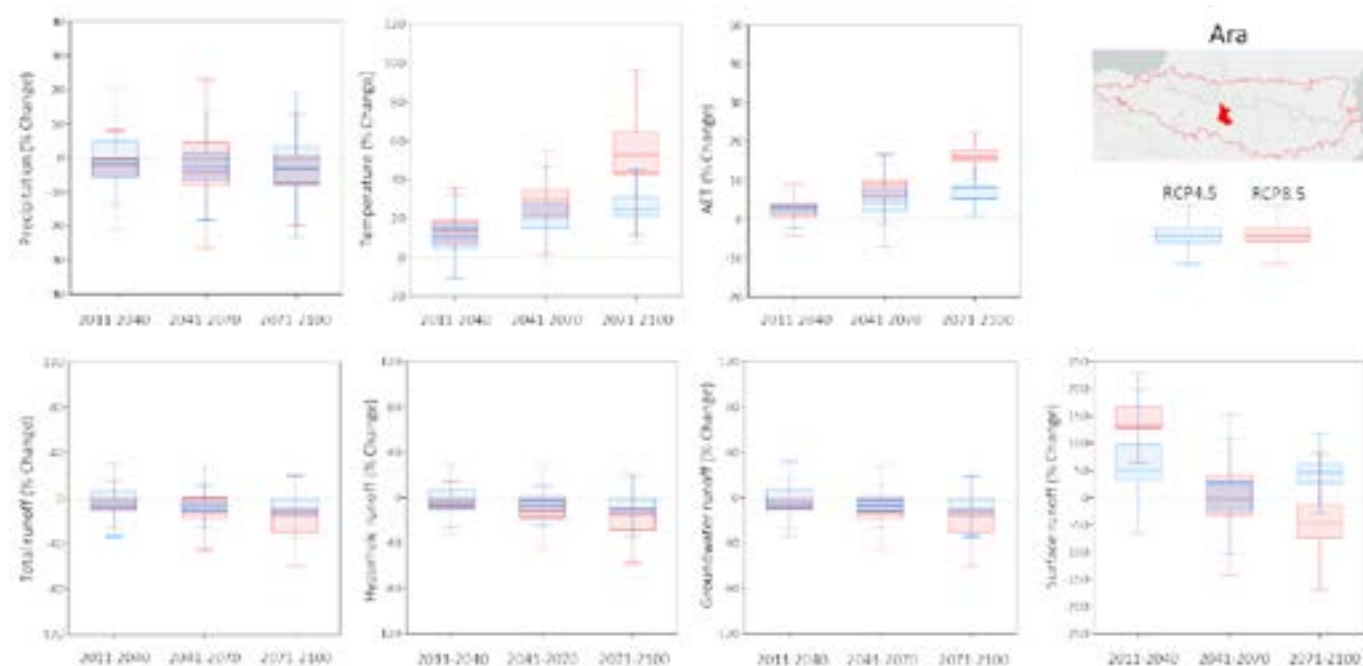


Figura 6.5. Variación con respecto al periodo de control (1961-2005) de la precipitación, la temperatura, la evapotranspiración, y los caudales de descarga total, de flujo hiporreico y subterráneo, así como de la escorrentía superficial, promediando los valores de cada una de estas variables para los periodos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100.

(Fuente: elaboración propia.)

En cuanto a los efectos del cambio climático en la cantidad de agua a escala local, los trabajos se han centrado en el sector comprendido entre el Macizo del Monte Perdido y la Cola de Caballo (Figura 6.7). Sobre este sector se desarrolla uno de los sistemas kársticos más importantes y extensos del Parque, dentro del denominado sistema acuífero superior (Lambán et al., 2015). Este sector incluye el Sistema Garcés, en cuyo interior se han instalado sensores para la medida continua del nivel, conductividad eléctrica y temperatura del agua del acuífero. Además, se han realizado e interpretado diferentes ensayos de

trazadores para verificar la conexión hidráulica en el interior del karst y evaluar la los tiempos de tránsito de los trazadores inyectados entre la parte alta del sistema kárstico y los manantiales de Garcés (Sifón Silvia) y Fuenblanca (Figura 6.8).

Los picos de crecida más importantes en el Sistema Garcés se producen en otoño, en relación con momentos de fuertes tormentas en periodos en los que aún no hay cobertura nival.

Durante el año hidrológico 2018/2019 se ha ido registrando la evolución hidroclimática del

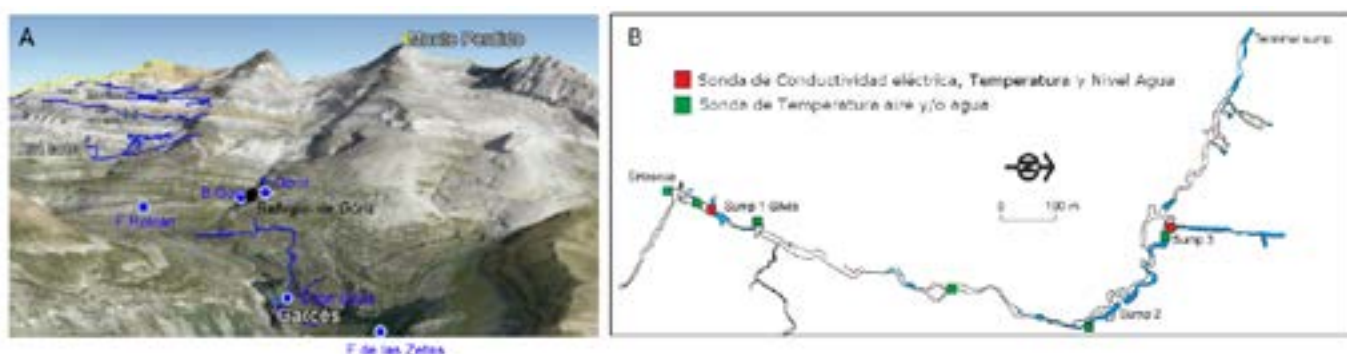


Figura 6.7. (A) Sector comprendido entre el macizo del Monte Perdido (3.355 m s.n.m) y la Cola de Caballo (1.800 m s.n.m). Puntos de la Red de control (Fuente de Góriz, Barranco de Góriz, Fuen Roldán, Fuente de las Zetas, y Sifón Silvia) y proyección en superficie de los sistemas kársticos principales (en azul). El sistema Graces es el sistema de menor elevación. (B) Sistema Garcés en detalle, donde se puede ver la ubicación de las distintas sondas de medida instaladas para monitorizar la respuesta hidrodinámica, química e isotópica del sistema ante las variaciones hidroclimáticas y antrópicas que pueden afectar a la recarga del acuífero.

(Fuente: elaboración propia.)

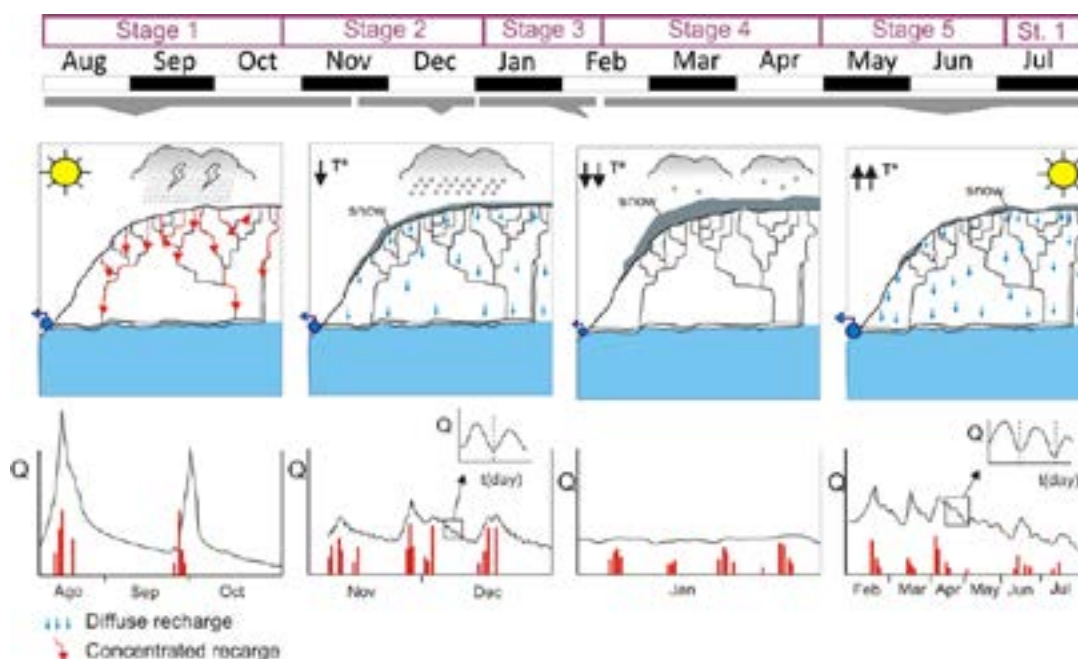


Figura 6.8. Esquema del modelo conceptual de recarga observado durante el año 2018/19 en el sistema kárstico de Garcés.

(Fuente: González-Ramón et al., 2020.)

PNOMP y la respuesta del sistema kárstico en términos de recarga. La Figura 6.9 presenta un resumen de la evolución de la recarga para este periodo. En noviembre y diciembre se observan dos pequeñas crecidas, así como ligeras variaciones diarias de caudal de recarga que indicarían su relación con las primeras nevadas del invierno y su fusión posterior, pues no hace frío aun como para que la nieve caída aguante sin fundirse mucho tiempo. La nieve fundida se infiltra y recarga el sistema. En enero, la precipitación es nival y el frío estabiliza el manto de nieve. Como no hay infiltración de agua desde la superficie que genere recarga, las variaciones diarias del caudal en el acuífero cesan y se mantienen estables hasta mediados de febrero, donde comienzan de nuevo a registrarse ligeras variaciones de caudal. Desde mediados de abril hasta mediados de julio el caudal de recarga presenta importantes fluctuaciones diarias debidas al ciclo de deshielo diurno (ergo infiltración y recarga) y congelación nocturna (ergo cese de la infiltración desde la superficie). A partir de agosto las crecidas nuevamente son puntuales y están relacionadas con la recarga de agua de lluvia procedente de tormentas, aunque estas registran una menor intensidad que las observadas en otoño.

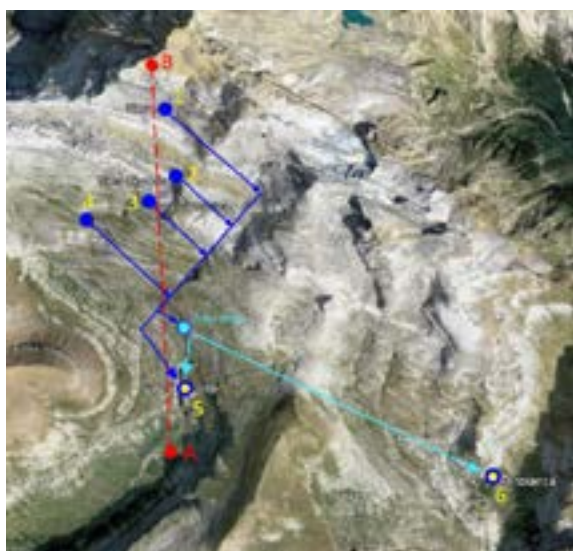


Figura 6.9. Puntos de inyección de trazador en el ensayo de agosto 2019 (1: Sima Marboré; (2) Sima Cigaloís; (3) Sima Tartracina; (4) Sima-60), y puntos de descarga asociados a los manantiales Garcés (5) y Fuenblanca (6) La línea A-B marca la trayectoria del perfil geológico mostrado en la Figura 6.12.

(Fuente: adaptado a partir de González-Ramón et al., 2020.)

El ensayo de campo con trazadores demostró la conexión directa entre el Barranco de Góriz y la Cueva de Garcés, así como la existencia de tiempos de tránsito extremadamente cortos. Esto pone de manifiesto lo amplia y conectada que es la estructura interna del karst, y la vulnerabilidad de éste ante un eventual episodio de contaminación y ante las consecuencias del cambio climático.

Durante las tormentas veraniegas y otoñales se observan subidas y bajadas rápidas de la temperatura y la conductividad eléctrica que muestran la existencia de llegada de agua de infiltración rápida seguidas de aportes de agua con mayor tiempo de residencia en el acuífero, lo que parece indicar efectos “pistón” posiblemente relacionados con la presencia de niveles saturados colgados (Jódar et al., 2020).

El ensayo de trazadores de agosto de 2019 permitió concluir que existe conexión entre los puntos de inyección y el manantial de Garcés (Figuras 6.9 y 6.10), de forma que las simas más lejanas presentan un tiempo de llegada mayor (9 días) que el asociado a las simas más próximas (5 días). El principal mecanismo del transporte de los trazadores es la advección, siendo el transporte dispersivo/difusivo poco relevante (Jódar et al., 2020). Esto implica que el caudal de agua subterránea que descarga en el sistema Garcés circula principalmente por conductos, galerías y fracturas de alta permeabilidad. A finales de octubre de 2019, fuera ya de la época de estiaje, se realizó otro ensayo de trazadores, inyectando estos en una sima del barranco de Góriz, 150 m aguas abajo del Refugio de Góriz (Figura 6.7).

Los resultados demostraron la conexión directa entre el Barranco de Góriz y la Cueva de Garcés, así como la existencia de tiempos de tránsito extremadamente cortos (Box 6.2), de 5 a 7 horas, que se dan en el sistema cuando los caudales de descarga son importantes. Esto pone de manifiesto lo amplia y conectada que es la estructura interna del karst y la vulnerabilidad de éste ante un eventual episodio de contaminación.

Box 6.2. Tiempo de tránsito.

El tiempo de tránsito informa sobre cuánto tiempo tarda la recarga en llegar a la salida del sistema. Esto incluye el tiempo que tarda el agua infiltrada en percolar a través de la zona no saturada del acuífero, que en PNOMP puede superar fácilmente los 500 m de espesor, hasta llegar al punto de descarga toda vez que el agua infiltrada alcanza el nivel freático. Esta información se obtiene mediante un modelo de mezcla pistón-exponencial (Małoszewski y Zuber, 1982; Jódar et al., 2014). El valor obtenido de tiempo de tránsito para el sistema acuífero es de 3,87 (Jódar et al., 2020). Por otro lado, los tiempos de llegada obtenidos en el ensayo de trazadores de 2019 (en ausencia de precipitación) oscilan entre 5 y 9 días, confirmando la existencia de un flujo subterráneo muy rápido a través de las fisuras y los elementos de la red kárstica más conductivos, lo que confirma la extrema vulnerabilidad del sistema frente al cambio climático.

6.3.4 Evaluación de los efectos del cambio climático y el turismo en la calidad de los recursos hídricos disponibles.

Esta evaluación se ha centrado de nuevo en el sector comprendido entre el Macizo del Monte Perdido y la Cola de Caballo, dos de los puntos más visitados y emblemáticos del Parque. Para ello, se han realizado diversas campañas de muestreo de agua en los puntos de la red de

control (Figura 6.7) así como en el interior del Sistema Garcés (Figura 6.11).

En los puntos de la red de control se han medido los parámetros físico-químicos del agua en campo y tomado muestras de agua para la realización de análisis biológicos (macroinvertebrados y clorofila), químicos (elementos mayoritarios, metales pesados y fármacos) e isotópicos. En los puntos situados en del Sistema Garcés (Figura 6.11) se han tomado muestras para análisis químicos (elementos mayoritarios, metales pesados y fármacos) e isotópicos.

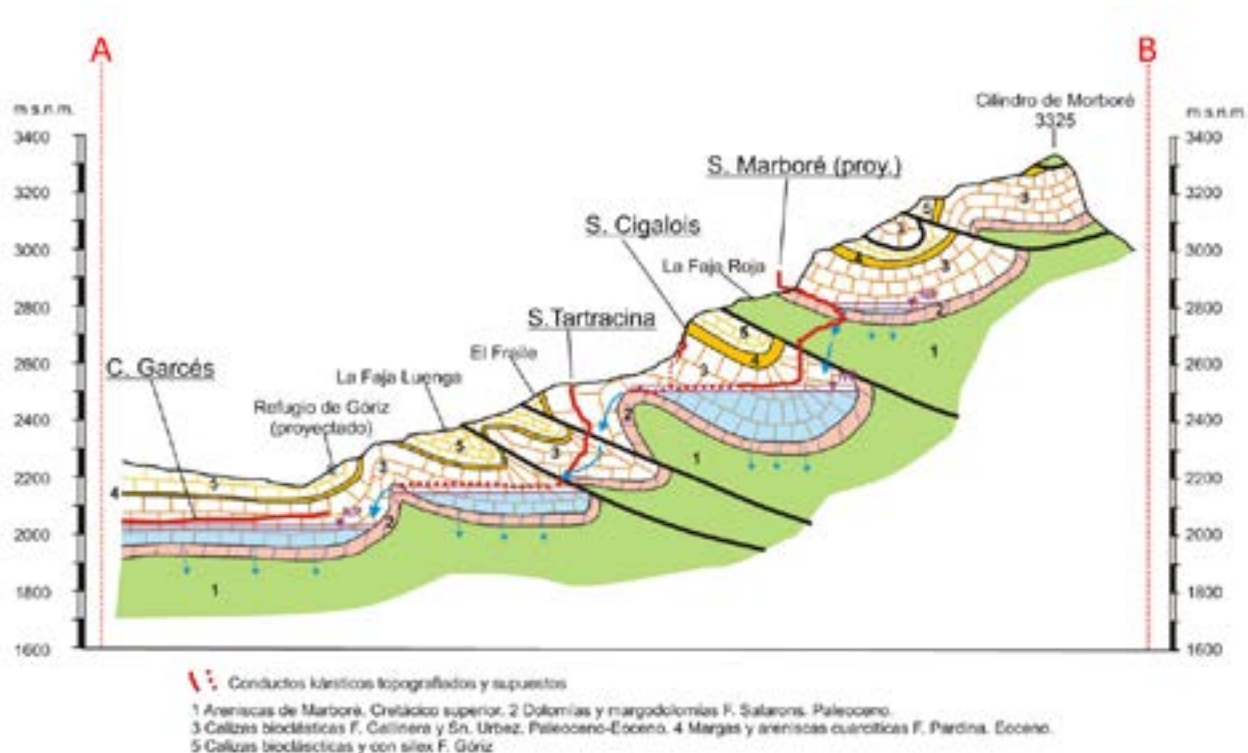


Figura 6.10. Corte geológico siguiendo el perfil A-B en la Figura 11. Sobre el corte se muestra la proyección de las simas a través de las cuales se inyectaron los diferentes trazadores. La línea roja, a tramos discontinua, indica la posible trayectoria de los trazadores con el flujo subterráneo a través del sistema kárstico.

(Fuente: modificado de González-Ramón et al., 2020.)

El estudio conjunto de los análisis de calidad de aguas realizados durante las campañas de 2018 y 2019 muestran una clara afección del refugio sobre la calidad del agua del Barranco de Goriz.

Durante los meses de verano, en los que se produce una mayor afluencia de visitantes, en este punto se observa que hay: a) mayor temperatura, conductividad eléctrica y menor oxígeno disuelto en el agua, b) alto contenido en NO₃, NH₄, PO₄, As, Cu, Fe, Mn, PO₄ y As, c) menor número de familias de macroinvertebrados (NFAM) con predominio de taxones tolerantes a condiciones estresantes, d) menor índice de calidad del agua (IBMWP) y e) presencia significativa de los fármacos Hidroclorotiazida, Gemfibrozil,

Carbamazepina, Albuterol y Atenolol. Con respecto al resto de puntos de control, por el momento no se dispone de información suficiente para poder evaluar la posible afección del turismo y del CC sobre la calidad del agua, por lo que se recomienda mantener el control de la calidad del agua más allá de la finalización del presente proyecto.

No obstante, la menor cantidad de los recursos hídricos disponibles como consecuencia de la disminución de la recarga, los cortos tiempos de tránsito obtenidos como consecuencia de la naturaleza kárstica del sistema, así como el incremento de visitantes, confirman la extrema vulnerabilidad que presenta la calidad del agua frente al cambio climático y al turismo.

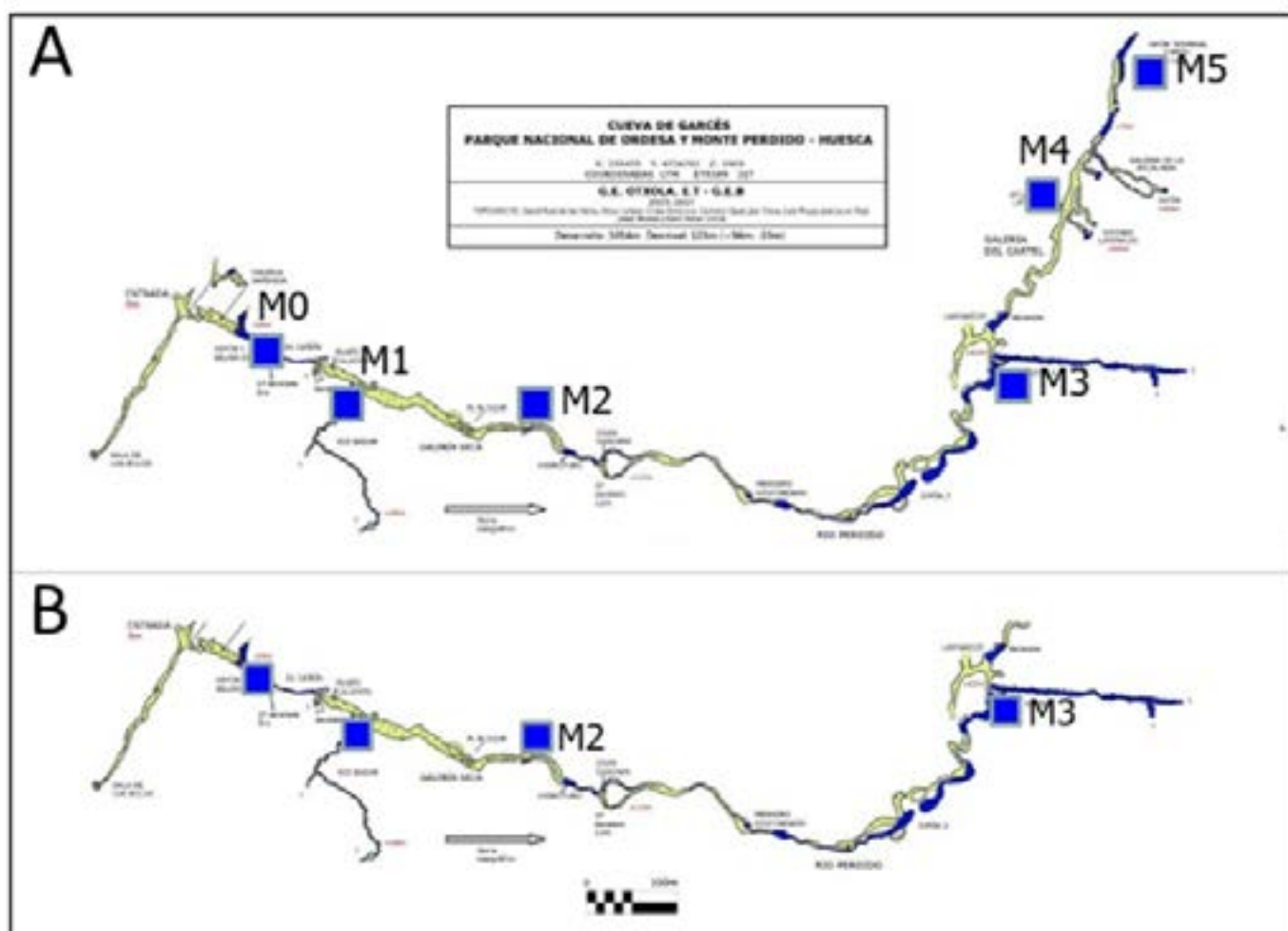


Figura 6.11. Puntos de muestreo de agua subterránea en el Sistema Garcés. (A) Campaña de muestreo 29/09/2018. (B) Campaña de muestreo 5/8/2019.

(Fuente: elaboración propia.)

6.4. Conclusión

El estudio del impacto del CC en áreas de especial valor ambiental en el Pirineo es esencial tanto para evaluar sus efectos sobre la biodiversidad como para mantener un motor económico tan importante como es el turismo. Los estudios de modelización realizados en el marco de este proyecto muestran que el aumento de la temperatura como consecuencia del CC va a disminuir la cubierta de nieve en todo el Pirineo, lo que supone una menor acumulación de nieve en la zona de recarga y una anticipación progresiva de la época de deshielo.

La menor cantidad de los recursos hídricos, los cortos tiempos de tránsito, así como el incremento de visitantes, confirman la extrema vulnerabilidad que presenta la calidad del agua frente al cambio climático y al turismo.

En el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido, los resultados obtenidos indican que (1) la recarga procedente de la fusión de nieve es la que controla el funcionamiento hidrogeológico, permitiendo mantener un determinado caudal de descarga durante el estiaje, y (2) el acuífero se comporta como un sistema de doble porosidad que viene descrito por una porosidad primaria correspondiente a los conductos kársticos y fracturas más conductivas del sistema, y por una porosidad secundaria correspondiente a las fracturas poco permeables, la esquistosidad y la porosidad drenable de la roca. Las estructuras de porosidad primaria y secundaria contribuyen $\frac{1}{4}$ y $\frac{3}{4}$, respectivamente, al caudal total de la descarga subterránea, y (3) los tiempos de tránsito del agua de recarga, desde que esta se infiltra hasta que surge en el manantial son relativamente rápidos, variando entre unos pocos días (5 días desde La Tartracina y S-60, y 9 días desde las simas Cigalois y Marboré) a poco más de un año (caudal en estiaje). Todo ello, confirma la extrema vulnerabilidad del sistema ante el cambio climático.

Buena parte del agua de precipitación de lluvia y nieve se infiltra en el subsuelo alimentando los acuíferos. Los trabajos de modelización realizados indican que entre el 50 y 60 % de la precipitación media anual recarga los acuíferos, manteniendo buena parte de los caudales ecológicos durante la

época de estiaje. En muchas ocasiones, como en el caso del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido, la mayor parte de los recursos hídricos, manantiales y/o ríos, tienen su origen en la descarga del agua subterránea, por lo que una disminución de la recarga afectará gravemente la disponibilidad del recurso hídrico, y por tanto a la biodiversidad y al valor ambiental de las zonas protegidas.

Que la respuesta del sistema venga controlada por la fusión nival, y que el acuífero presente tiempos de tránsito cortos como consecuencia de la naturaleza kárstica del terreno, pone de manifiesto la extrema vulnerabilidad de los recursos hídricos superficiales y subterráneos frente al cambio climático.

Los resultados obtenidos en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido pueden ser extrapolables a otras zonas protegidas del Pirineo. El aumento de la temperatura, la disminución de la precipitación en forma de nieve, la menor duración de la cobertura de nieve, durante la primavera y otoño, principalmente, y el adelantamiento progresivo de la época de deshielo, provocará una disminución de la recarga y descarga subterránea durante el estiaje, afectando significativamente a la biodiversidad. Este impacto será todavía mayor en zonas protegidas asociadas a acuíferos carbonatados y/o karstificados. En estas zonas, la alta permeabilidad característica de dichos acuíferos provoca altas velocidades de flujo, lo que, unido a la disminución de los caudales que fluyen por el sistema, tendrá implicaciones importantes en el transporte de los contaminantes que pudiesen existir en el entorno y llegar al acuífero.

Como medidas de adaptación en relación con la cantidad de los recursos hídricos se propone: a) almacenamiento de la precipitación mediante aljibes o depósitos adaptados, instalados y distribuidos estratégicamente en diferentes puntos del PNOMP; b) uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas; y c) diseño y construcción de pozos para el abastecimiento en épocas de estiaje.

Con respecto a las medidas de adaptación relacionadas con la calidad de los recursos hídricos se proponen:

- Medidas de gestión: a) control del número de visitantes y pernoctas realizadas en refugios de montaña, zonas de acampada y puntos de mayor afluencia de visitantes y b) recomendaciones para la optimización tanto en la generación como en el tratamiento de los residuos generados en refugios de montaña y zonas de acampada.
- Medidas de concienciación: mediante charlas, talleres, folletos divulgativos..., destinadas a guardas del refugio, personal que trabaje en zonas protegidas, APN, a la población local y visitantes.

7. Adaptación al cambio climático desde la gestión de la funcionalidad hidrológica del territorio: el caso de la cuenca del río Bidasoa

**Iñaki Antigüedad, Maite Meaurio, María Valiente,
Jesus Uriarte, Ane Zabaleta (Grupo Investigación “Procesos Hidro-Ambientales”, Dpto
Geología, Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea, UPV/EHU)**

Este capítulo trata de visibilizar la necesidad de considerar los procesos del ciclo del agua en la planificación y gestión del Territorio (a escala de cuenca fluvial), adaptando los usos del suelo a la conservación, y recuperación, de los diferentes servicios ecosistémicos, sobre todo los hidrológicos. Así, el objetivo es la adaptación del Territorio desde su funcionalidad hidrológica, priorizando zonas de la cuenca que proporcionan servicios hidrológicos (provisión de agua, en cantidad y calidad, en espacio y tiempo) y teniendo en cuenta su compleja relación con otros servicios ecosistémicos (aprovisionamiento, regulación, soporte, culturales). De este modo, la diversidad y complementariedad de servicios en el Territorio vendría dada por un mosaico de diferentes usos del suelo planificado desde, y para, la adaptación hidrológica. Consideramos que, así como el Carbono es el eje de las medidas de Mitigación, a escala global, el Agua es el eje de la Adaptación, a escala de cuenca. Siendo el objetivo del proyecto PIRAGUA el establecimiento de medidas de incidencia territorial para la adaptación al cambio climático, no se consideran aquí aspectos relativos a la gestión de la demanda de agua.

Se trata de actuar en los espacios más cambiantes del Territorio (es decir, en las zonas de la cuenca fluvial donde en el pasado más reciente se vienen produciendo cambios en los usos del suelo) para determinar cómo adaptar sus usos futuros al cambio climático desde la consideración de la mejora de los servicios hidrológicos. Este objetivo es más prioritario en los espacios territoriales que definen las zonas de recarga de las captaciones de agua (superficiales y subterráneas), actuales o futuras, que deben ser consideradas como zonas estratégicas en la ordenación territorial, y no solo en la planificación hidrológica.

Se tienen en cuenta dos tipos de usos en el Territorio: aquellos que están consolidados en el tiempo, y que no suponen cambios importantes en el estado de las masas vegetales (y del suelo que las sustenta); y aquellos que están en situación de cambio, natural o planificado, y suponen una alteración importante en el estado de las masas vegetales (y del suelo). Los primeros se relacionan, sobre todo, con masas boscosas de varias decenas de años, en las que el tipo de gestión que se realiza no supone cambios relevantes desde el punto de vista hidrológico. Además, al tratarse de masas adultas, la evapotranspiración no es tan importante como en el caso de masas arbóreas más jóvenes.

Los segundos se relacionan con diferentes tipos de usos y situaciones: desde prados que están en proceso de abandono, hasta plantaciones de especies de crecimiento rápido con ciclos de rotación cortos, alterando las condiciones de la evapotranspiración, además de las propias de los suelos. En este caso, no a todas las zonas se les debe atribuir la misma prioridad: en algunas, se deben priorizar los servicios hidro-ecosistémicos (relacionados con la existencia de captaciones, superficiales y subterráneas, o la necesidad de mantener caudales ambientales en los cursos de agua); en otras, es posible priorizar otro tipo de servicios, como la fijación de carbono o la producción de madera, la ganadería, etc ... buscando la complementariedad de servicios en el Territorio mediante un mosaico planificado de usos del suelo.

La adaptación territorial (resiliencia territorial) debe comenzar en aquellas zonas en situación de cambio en las que los servicios hidrológicos sean una prioridad. Para ello, es necesario establecer criterios basados en evidencias obtenidas en el terreno sobre la funcionalidad hidrológica del Territorio. Los criterios pueden incluir la apuesta por la propiedad pública, o comunal, de los espacios territoriales definidos como de “prioridad hidrológica”. Es desde esta perspectiva que hemos investigando en el caso de estudio de la cuenca del Bidasoa (Navarra).

7.1. Introducción

Vivimos inmersos en una época de incertidumbres en todos los ámbitos y cuyo alcance, con frecuencia, desconocemos. De ahí la necesidad de profundizar en el conocimiento de dónde estamos, cómo hemos llegado hasta aquí y qué podemos hacer ante los diferentes escenarios posibles a corto, medio y largo plazo en nuestros territorios. Es tanto como decir que hay que convivir con la complejidad de los procesos, sociales y territoriales, y con la robusta flexibilidad de las decisiones, y aprender a gestionar el territorio y sus recursos desde una visión adaptativa a cambios que ya están en marcha. Se trata de determinar las transformaciones necesarias para que las sociedades, en nuestro caso del ámbito pirenaico, puedan mantenerse en el tiempo.

Dicho en una palabra, la sostenibilidad es, sin duda, el reto más importante, y difícil, que tienen las sociedades en el siglo XXI, entendida como capacidad de un sistema social para adaptarse al entorno territorial, contemplando todas las dimensiones responsables del deterioro ambiental. En el informe que la ONU presentó en la Cumbre de la Tierra en 2002 su Secretario General decía que para alcanzar la sostenibilidad en el planeta era necesario alcanzarla en todos los lugares, y sustentarla en la integración de cinco pilares: Agua, Energía, Salud, Agricultura y Biodiversidad (WEHAB por sus siglas en inglés). Por tanto, Agua es un eje esencial en la apuesta por la sostenibilidad, y es el Agua, junto con el Territorio, el eje central del proyecto PIRAGUA.

Centrándonos en el Agua, actuar en términos de Adaptación supone conocer la dinámica del entorno (Territorio) al que nos debemos adaptar, y esta dinámica es evolutiva en el tiempo, y sometida a incertidumbres. De hecho, si los futuros escenarios climáticos que se derivan de los Modelos de Circulación General abarcan, con incertidumbres, un amplio rango de posibilidades, ese rango es mucho mayor cuando nos referimos a los escenarios hidrológicos. Es aquí donde el Territorio (suelo: naturaleza, usos y gestión, cobertera vegetal) tiene una influencia crucial, marginada con frecuencia en la planificación hidrológica. La importancia de la función hidrológica del Territorio en la dinámica del río ha sido evidenciada en muchos estudios.

Los Espacios de Prioridad Hidrológica (EPH) son aquellas partes del territorio cuya prioridad debe ser garantizar la disponibilidad, en espacio y tiempo, de los recursos hídricos necesarios a futuro, en cantidad y calidad adecuados.

Como referencia, Fohrer et al. (2005) critican que los cambios de usos del suelo no suelen ser considerados como procesos dinámicos en la modelización hidrológica, al asumir que no tienen efecto sobre las propiedades de los suelos o en el microclima; esa simplificación, además, puede tener consecuencias significativas en los resultados de la modelización. Según estos autores, la evaluación del riesgo asociado a los cambios futuros en los usos del suelo respecto a su impacto ecológico, incluido el hidrológico, es una cuestión todavía no resuelta. Para ello, ven necesaria la implementación de conceptos relacionados con el “uso sostenible del suelo” que, a su vez, requieren una metodología capaz de cuantificar los efectos de esos cambios en el régimen hídrico de las cuencas.

Hablamos de resiliencia hidrológica, del Territorio, y de la población en él asentada; en el primer caso, de aumentar la capacidad reguladora de la cuenca con medidas de incidencia territorial orientadas a ordenar usos del suelo con visión hidrológica; y en el segundo, de establecer criterios fundamentados para los cambios a realizar en la gestión de los servicios del agua como adaptación a escenarios venideros. Es decir, una visión CUENCA del río, más allá de su visión CAUCE. En la visión CUENCA (Figura 7.1) se trata de considerar el territorio no sólo como receptor de efectos derivados del Cambio Climático, sino también como causa añadida, o amortiguadora (efectos hidrológicos de la ordenación territorial, que afectan, sobre todo, la evapotranspiración y la capacidad reguladora de las diferentes partes del Territorio). Desde esta visión, la gestión adaptativa del territorio debe ayudar a mitigar (mitigación) los efectos no deseados del cambio, en concreto, sobre los recursos hídricos.

Evidentemente, hay que actuar con proyecciones de posibles escenarios futuros (scenario-based approach) pero éstas tienen que basarse en el conocimiento de los procesos actuales y en

su dinámica espacio-temporal (process-based hydrological models), lo que requiere de un mayor esfuerzo en la investigación del territorio (monitoring). Se trata de entender el corto plazo y la escala local en el contexto del largo plazo y la escala regional, asumiendo la complejidad de las decisiones.

A medida que ha ido aumentando la concienciación sobre los impactos ambientales que nuestros modos de vida generan, se ha hecho más habitual referirnos a los Servicios Ecosistémicos (SE), considerando como tales aquellos beneficios que el propio funcionamiento de los ecosistemas aportan a la sociedad y que mejoran la salud, la economía y la calidad de vida de las personas. El reconocimiento de estos servicios combina la preservación de los ecosistemas con su uso y gestión sostenibles.

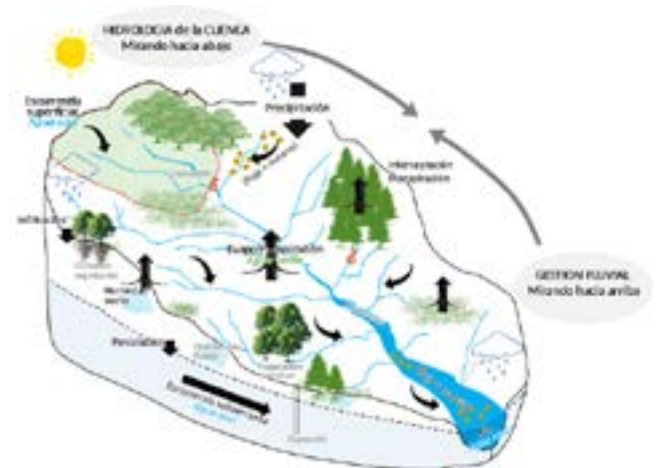


Figura 7.1. La cuenca fluvial como sistema integrado de procesos: visión CUENCA, esencial para la gestión adaptativa del territorio, más allá del cauce (modificado de Zabaleta et al., 2021). Se ha señalado en rojo un espacio de prioridad hidrológica (EPH) asociado a una captación.

(Fuente: adaptado de Zabaleta et al., 2021.)

Existen cuatro tipos de SE, según el beneficio que ofrezcan: aprovisionamiento, regulación, de soporte y culturales (<https://mma.gob.cl/servicios-ecosistemas/>). La asignación de beneficios específicos a los ecosistemas de un mismo territorio no es tarea fácil, ya que aquéllos pueden solaparse o, incluso, compensarse (trade-offs; por ejemplo, la fijación de carbono reduce

la disponibilidad de agua), por lo que habría que establecer prioridades de beneficios para los diferentes espacios del territorio, lo que nos llevaría a un mosaico de cubiertas-usos en la gestión adaptativa del territorio (territorialización de la Adaptación).

A pesar de la notoriedad que los SE adquieren en las estrategias de recuperación ambiental, no siempre están bien representados en ellos los beneficios relacionados con el Agua. En este sentido, una referencia obligada es Brauman et al. (2007), que pusieron en valor los Servicios Hidrológicos (SH) ofrecidos por los ecosistemas, y categorizaron los beneficios derivados de los procesos ecohidrológicos en cuatro ámbitos: cantidad, calidad, localización y momento. Portela et al. (2019) enfatizan el valor como servicio ecosistémico del aprovisionamiento en agua.

En consonancia con lo hasta ahora comentado, el presente capítulo trata de extender en las poblaciones del entorno pirenaico el necesario cambio de paradigma en la forma de entender el Agua y el Territorio. El cambio climático en curso, con el inherente calentamiento global, repercute sobre el ciclo hidrológico a escala de cuenca (con distintas consecuencias en espacio y tiempo, según zonas a lo largo de los Pirineos), y en mayor medida sobre procesos claves (la evapotranspiración, que se relaciona directamente con la ordenación de usos del suelo, ésta ya dependiente de las decisiones que actualmente se toman).

El cambio de paradigma es necesario para avanzar hacia una gestión adaptativa del territorio ante escenarios futuros. Más en concreto, nos interesamos aquí por los Espacios de Prioridad Hidrológica (EPH), aquéllas partes del territorio cuya prioridad debe ser garantizar la disponibilidad, en espacio y tiempo, de los recursos hídricos necesarios a futuro, en cantidad y calidad. Es tanto como decir que, como caso concreto esencial, las áreas de captación de aguas para el abastecimiento, actual o futuro, sea cual sea la naturaleza y escala del sistema de captación considerado, deben ser desde ya consideradas en

la planificación territorial como zonas estratégicas de prioridad hidrológica, abarcando también las cuencas de alimentación, superficiales y/o subterráneas, de las captaciones.

Box 7.1. La funcionalidad hidrológica del suelo o el sistema planta-suelo-agua.

El suelo sigue siendo el “paciente olvidado” de la planificación territorial y de la hidrológica, a pesar de que se reconocen justamente sus valores ecosistémicos y sus funciones de provisión y regulación, también la hidrológica (FAO, 2015). Sin embargo, en Europa el suelo no ha llegado a tener la consideración dada al agua por la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/EC). Los intentos a partir de la Estrategia Temática del Suelo (COM (2002) 179 final), que llevaron a una propuesta de Directiva (COM (2006) 232 final), nunca alcanzaron ese objetivo, siendo, a día de hoy, demasiado grande la brecha, en términos de legislación, existente entre esas dos matrices básicas de la sostenibilidad.

El suelo posee una funcionalidad hidrológica que determina el reparto de las precipitaciones en agua azul, (escorrentía superficial, subterránea) y agua verde (evapotranspiración) actuando la variación temporal de humedad de suelo como servicio regulador de esa distribución. La humedad condiciona el desarrollo de la vegetación y ésta, a su vez, condiciona la humedad del suelo (Asbjornsen et al., 2011). La hidrología del suelo es un factor clave en la gestión sostenible del territorio, de forma que los cambios planificados en el uso del suelo deben considerar los posibles efectos en los servicios ecosistémicos del suelo.

La propiedad más importante del suelo que condiciona su funcionalidad hidrológica es la capacidad de retención de agua. Esta propiedad es intrínseca del suelo, aunque puede verse alterada por la gestión. Esa retención se presenta como un servicio ecosistémico de regulación (Burkhard et al., 2019), del que dependen otros servicios más usualmente reconocidos como la biodiversidad, producción de biomasa, fijación de carbono, o la regulación de nutrientes, entre otros. Keys et al. (2016) consideran el reciclaje de humedad del suelo como servicio ecosistémico, analizando la evapotranspiración en una parte de la cuenca como fuente de humedad atmosférica generadora de precipitaciones en otra parte de la cuenca, en el sentido del viento, si bien la importancia de esta retroalimentación es a tener en cuenta, sobre todo, en grandes cuencas y no en cuencas de reducida extensión como son muchas cuencas de cabecera pirenaicas.

En un reciente informe la Agencia Europea de Medio Ambiente recoge que el contenido en humedad de los suelos europeos en regiones mediterráneas ha disminuido de forma notable desde los años 50 como consecuencia del calentamiento global y de cambios en el régimen de las precipitaciones, mientras que ha aumentado en las regiones del norte europeo. Las proyecciones para las décadas venideras muestran una consolidación de esas tendencias, con un descenso más significativo todavía en los meses de verano en el ámbito mediterráneo. A la vista de estas tendencias, que afectan sobre todo al Pirineo mediterráneo, adquiere más importancia, si cabe, la apuesta por una gestión adaptativa del suelo/vegetación que favorezca la humedad del suelo en la época estival, a la vez que garantice la disponibilidad temporal del agua fluyente (agua azul) en los espacios de prioridad hidrológica.

A finales de 2020 el Observatorio Pirenaico del Cambio Climático OPCC presentó la Alianza de Suelos de los Pirineos (ASPIr) como “una red de entidades y personas para la cooperación transfronteriza en el ámbito de los suelos” e “instrumento muy útil para poder armonizar políticas y actuaciones en los Pirineos entre los tres estados”. El objetivo principal es “la conservación del suelo y mantenimiento o mejora de su calidad, mediante la aplicación de prácticas sostenibles de manejo”, y entre los objetivos particulares, junto con tener una base de datos, conocer las reservas y potencial de almacenamiento de carbono, y evitar procesos de erosión, se encuentra “proteger aquellos suelos que realizan una función de recarga de acuíferos como medida de adaptación al cambio climático”.

Este enfoque, aunque de todo punto necesario por el reconocimiento implícito de las funciones del suelo es, sin embargo, bastante limitado en lo que a la función hidrológica del suelo se refiere, ya que la reduce a la recarga de acuíferos (y al efecto regulador ante inundaciones, también citado), y, además, no deja entrever la relación suelo-planta-agua que condiciona el reparto de las precipitaciones y, por tanto, la evapotranspiración real y su estacionalidad. Sería necesario que en su desarrollo la Alianza incorporase estos aspectos, esenciales en las políticas territoriales de Adaptación, generando conocimiento y concienciación, sobre todo en el Eje 1 de actuación: Acción por el Clima.

7.2 Retos de la gestión del territorio ante el cambio climático y el cambio global

7.2.1 Retos del cambio climático sobre la planificación hidrológica y del territorio

El cambio climático, con sus inherentes incertidumbres en los diferentes escenarios espaciales y temporales, tiene notables impactos en el ciclo hidrológico (amplifica sus procesos extremos) que están alterando la cantidad, la calidad y la distribución de los recursos, y, por tanto, su disponibilidad espacial (dónde) y temporal (cuándo). El cambio climático como generador de impactos en los sistemas hídricos no está en discusión y es usual su consideración, más o menos argumentada científicamente, en la planificación hidrológica (y en las modelizaciones en las que se sustentan los posibles escenarios hidrológicos futuros), pero no en la planificación territorial.

Y es que, precisamente, hay otro cambio a considerar, el de la cubierta/uso del suelo (incluido el posible cambio en su gestión), éste ya dependiente directamente de las decisiones actuales de las administraciones públicas a diferentes escalas territoriales (sobre todo a través de la ordenación del territorio; políticas forestales, de importancia en zonas de montaña, y agrarias). Los impactos derivados de este cambio no suelen ser considerados en la planificación hidrológica, que es tanto como decir que la planificación hidrológica no considera en su justa medida la funcionalidad hidrológica de las diferentes partes del territorio.

Es esencial conocer y explorar las posibilidades de adaptación desde el propio territorio considerando la función hidrológica del suelo y las necesidades hídricas de las diferentes cubiertas vegetales.

Si bien es cierto que puede llegar a ser bastante difícil separar los efectos hidrológicos de ambos cambios (clima y usos del suelo), más aún en la escala temporal, no es menos cierto que ambos deben ser adecuadamente tenidos en cuenta y que las decisiones que se vayan tomando deben ser informadas por las evidencias derivadas de la investigación sustentada en el control temporal de los procesos hidrológicos a escala de cuenca.

La separación de efectos es muy importante porque, además de permitir proyectar escenarios hidrológicos futuros (escala de cuenca), de acuerdo a los escenarios climáticos previstos, permite establecer desde la situación presente medidas de incidencia territorial, a través de la planificación y gestión espacial de usos del suelo, con una visión estratégica de adaptación.

De hecho, en teoría al menos, el objetivo principal de la planificación hidrológica debería ser la planificación de las precipitaciones (P) y no tanto la de los caudales circulantes (Q), superficiales y/o subterráneos. Ahora bien, es claro que el régimen espacio-temporal de las precipitaciones (lluvia, nieve) se escapa del ámbito de la planificación, ya que se impone a la misma. Por eso cobra especial importancia en la planificación la consideración del tercer término esencial en el balance hídrico de la cuenca: la evapotranspiración (ET).

Al ser los caudales circulantes (Q) la parte no evapotranspirada de las precipitaciones habidas en un periodo de tiempo ($Q = P - ET$), y, más aún, teniendo en cuenta los impactos, actuales y futuros, debidos al cambio climático (sobre todo por el calentamiento global) tiene sentido que la planificación hidrológica se interese también por la planificación de la ET mediante la consideración de la propia planificación territorial (cubierta y usos del suelo).

Es decir, si en un futuro cercano la P de un territorio se mantuviese (más grave sería si la tendencia fuese decreciente) pero su ET fuese en aumento, los caudales (Q) disponibles disminuirían. No tiene sentido que la planificación hidrológica se limite a planificar sólo la parte final de la secuencia del ciclo hidrológico, menos aún en época de grandes cambios ambientales con resultados muy inciertos. Hay que asegurar la disponibilidad espacial y temporal de los recursos hídricos para hacer que los territorios sean resilientes, como base física para sociedades resilientes. Esto supone reducir el esperable aumento de la ET mediante nuevas orientaciones, sobre todo, en la política forestal, al menos, en los Espacios de Prioridad Hidrológica (EPH).

Dicho de otra manera, la planificación territorial debería ser parte de la planificación hidrológica,

y, por tanto, tanto una como otra deberían ser consideradas medidas básicas de Adaptación al cambio climático, desde el propio territorio. De hecho, el primer paso hacia la Adaptación debería ser planificar la reducción de la vulnerabilidad a los cambios, y, para ello, es de todo punto necesario determinar, y separar, las causas, climáticas y no climáticas, que condicionan esa vulnerabilidad, ya que estas últimas son las únicas que pueden abordarse desde las políticas territoriales.

La Evapotranspiración (ET)

La evapotranspiración es uno de los términos básicos del balance hídrico y, sin duda, el más difícil de medir. En general, es el proceso global de transferencia de agua a la atmósfera a partir de un suelo y de su cubierta vegetal. En concreto, es el proceso combinado de la evaporación desde superficies líquidas, el suelo y/o la parte aérea de la vegetación, y de la transpiración del agua de los tejidos de las plantas. El proceso varía según radiación, temperatura, humedad atmosférica y velocidad del viento. Las dos primeras (término energético) están relacionadas con la energía necesaria para transformar el líquido en vapor. Las dos últimas (término aerodinámico), con la capacidad del aire para recibir vapor de agua y con la renovación del aire (Allen et al., 1998).

En hidrología es habitual referirse a la evapotranspiración real (ETR, mm) como la cantidad de agua realmente evapotranspirada desde un suelo con vegetación, en un tiempo dado, en función de la disponibilidad de agua (humedad), a diferencia de la evapotranspiración potencial (ETP, mm) que sería la cantidad de agua evapotranspirada si no hubiese limitación alguna de humedad en el suelo. De ahí la importancia de la humedad del suelo como factor condicionante de que en el crecimiento de la vegetación ésta pueda tener disponible el agua necesaria.

En la práctica, con cierta frecuencia, la planificación hidrológica llega a asumir que la ETR depende sólo de las condiciones externas, las ligadas al clima, infravalorando el hecho de

que depende, también, en buena medida, de las condiciones de ocupación del territorio (humedad del suelo, tipo y estado-edad de la vegetación, estructura de la cubierta vegetal ...). Además, es frecuente hablar de la ETR (mm) en términos anuales, cuando, en realidad, importa mucho más su evolución estacional (la vulnerabilidad hídrica a futuro tiene una componente claramente estacional), cuestión ésta, la estacionalidad, que no queda reflejada en el balance hídrico anual, o multianual.

A pesar del mayor interés dado en la planificación hidrológica a las precipitaciones-temperaturas y a los caudales, la evapotranspiración es uno de los términos más condicionantes del balance hídrico.

Se puede decir que lo mismo que el suelo es el término olvidado de la planificación hidrológica, la evapotranspiración es el término olvidado del balance hídrico.

En muchas zonas de los Pirineos los bosques, expresado en términos generales, ocupan superficies importantes de las cuencas fluviales, por eso es necesario echar una mirada a las evidencias recogidas en la literatura en el campo de la Hidrología Forestal. Los estudios científicos a lo largo del planeta han establecido con claridad que el aumento de la presencia del bosque implica una disminución de los recursos hídricos (agua azul, la que fluye) y viceversa (Bosch y Hewlett, 1982; Zhang et al., 2001) si bien, también es necesario considerar la escala espacial de la cuenca, ya que en cuencas muy extensas la relación puede cambiar si parte del agua evapotranspirada vuelve a la cuenca en forma de precipitación (Ellison et al., 2012). Esta relación, con algunas excepciones, abarca un amplio abanico de climas y especies vegetales, y es debido al hecho de que los árboles evapotranspiran más agua (agua verde) que otros tipos de vegetación más baja.

En cualquier caso, los bosques son grandes consumidores de agua (ET). El efecto que ello puede originar en el balance hídrico de la cuenca depende de las condiciones limitantes en cada caso. Así, en cuencas donde la limitación a la ET es energética, es decir, la precipitación (P) es mayor que la ETP, la ETR está muy cerca de la

ETP (a la escala anual dependería de la evolución estacional de P y ETP); sería el caso de zonas húmedas. Sin embargo, en climas secos, donde la limitación a la ET es la disponibilidad de agua, la ETR puede ser una parte muy importante de la precipitación anual, incidiendo negativamente en los caudales (agua azul). Obviamente, considerando el tipo, edad, estado y densidad de la vegetación (Ellison et al., 2017).

La Figura 7.2 muestra las implicaciones prácticas de las dos situaciones en los extremos cantábrico y mediterráneo de los Pirineos. Por un lado, se representan los datos anuales de P (mm), ETR (mm) y caudal (Q, mm, registrados en estaciones de aforo) en 5 cuencas de Gipuzkoa, que cubren casi todo el territorio (1980 km²), para el periodo 2001-2019 (Box 7.2). Por otro lado, para los mismos parámetros, se representan los datos anuales de la cuenca de Avic (52 km²) en la sierra de Prades (Tarragona), entre 1986 y 2003; estos datos se han tomado de Bellot et al. (2004) y se han representado de la misma forma que los de Gipuzkoa para facilitar su comparación (Box 7.3). Hemos considerado la cuenca de Prades como referencia de comportamiento hidrológico de una cuenca forestal en clima mediterráneo, por la disponibilidad de datos para un amplio periodo de años, si bien en sentido estricto se sale del ámbito territorial de los Pirineos.

En lo que a la precipitación anual se refiere es evidente que Gipuzkoa se sitúa en una zona húmeda con amplio rango de valores, alcanzando valores superiores a 3000 mm en el límite con Navarra (cuenca del Bidasoa), mientras que en Avic no es habitual que las precipitaciones excedan de 750 mm. Respecto a la cubierta vegetal, en Avic el encinar cubre prácticamente la totalidad de la cuenca, mientras que en Gipuzkoa los pastos cubren un 23 % y el bosque se reparte entre nativo (roble y haya), con un 31 %, y exótico (plantaciones de rápido crecimiento con especies de pinos), con un 41 % (Zabaleta et al., 2018). Los suelos en ambos casos son de reducido espesor, inferiores en general a 1,5 m. La geología, por su parte, corresponde de forma amplia a formaciones de baja o muy baja permeabilidad.

A la vista de la figura, es evidente que ambos casos se relacionan bien con los límites antes

comentados para la ET. Así, en Gipuzkoa la limitación es energética, no de disponibilidad de agua. La relación P-Q es muy buena, indicando que un aumento (disminución) de la precipitación anual implica claramente un aumento (disminución) del caudal anual (Q), mientras que los valores anuales de ETR varían relativamente poco (500-800 mm, con valor medio de 670 mm), independientemente de la precipitación. Se podría decir que, de forma aproximada (sin bajar a la escala de cuenca y sin considerar la estacionalidad), la ETR está cerca de la ETP en el territorio (si bien no se observa tendencia al aumento de la ETR en estos últimos 20 años, a futuro habría que considerar el aumento esperado por subida de las temperaturas). Al expresar estas relaciones en términos porcentuales se observa que una disminución de la P anual supone una disminución del Q y el correspondiente aumento de la ETR (un descenso de 200 mm en la P anual supone un descenso de 3.4 en el porcentaje de Q y la misma subida en ETR).

Sin embargo, el caso de Avic es típico de una cuenca donde el límite a la ET es la disponibilidad de agua. Así, la relación más

evidente y altamente significativa es P-ETR, aunque la relación P-Q también es a tener en cuenta, ambas positivas. En este caso, un aumento (disminución) de la precipitación anual implica claramente un aumento (disminución) de la ETR anual, proceso que prevalece sobre el de la generación de flujo (Q) que se ve favorecido a medida que la P aumenta. A pesar del aumento de la ETR con la P, no se llega a alcanzar la ETP que los autores (Bellot et al., 2004) establecen en el rango aproximado de 1000-1100 mm. En términos porcentuales, la disminución de la P anual supone un aumento de la ETR y la consiguiente disminución en el Q (un descenso de 200 mm en la P anual supone un aumento de 3.6 en el porcentaje de ETR y el mismo descenso en Q; es decir, tendencias similares al caso anterior).

Tres términos esenciales del balance hídrico son la precipitación (P), la evapotranspiración potencial (ETP), y la evapotranspiración real (ETR). Si el cambio climático afecta a las dos primeras (P y ETP), el cambio en los usos del suelo afecta, sobre todo, al tercero (ETR).

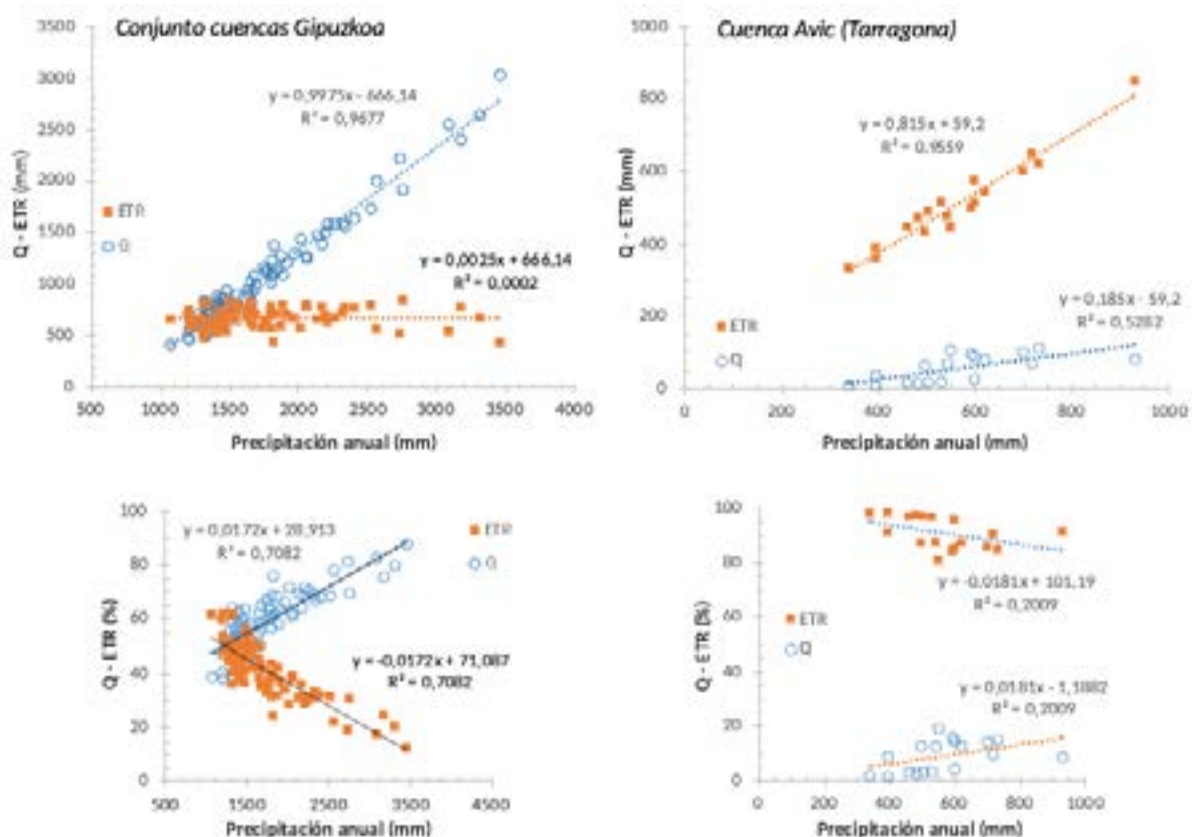


Figura 7.2. Relación entre valores anuales de precipitación (P), evapotranspiración real (ETR) y caudal (Q) en las cuencas de Avic (derecha) y Gipuzkoa (izquierda).

(Fuente: modificado de Bellot et al., 2004, y elaboración propia.)

Box 7.2. Micro-caso de estudio de las cuencas de Gipuzkoa (gradiente de precipitaciones).

Zabaleta et al. (2018) llevaron a cabo un estudio con objeto de establecer la relación entre diferentes cubiertas del suelo (bosques - nativo y exótico - y pastos) y los servicios hidrológicos, usando para ello índices hidrológicos obtenidos, a escala anual y estacional, a partir de las series de caudales obtenidas en estaciones de aforo. El estudio cubrió el territorio de Gipuzkoa (extremo occidental de los Pirineos), con un fuerte gradiente de precipitaciones de Oeste a Este (900 - 2600 mm/año) y temperaturas templadas (media anual de 13 °C; 8-10°C en invierno, 18-20 °C en verano). El rango de altitudes va desde la costa hasta los 1554 m. Las pendientes son bastante fuertes, con valores medios entre 40 y 50 % en la mayor parte del territorio. El área de estudio es litológicamente diversa, con materiales desde el Paleozoico hasta el Cuaternario, la mayor parte de los cuales son de baja o muy baja permeabilidad.

El espesor medio del suelo es de 1 m, pero muy variable en el espacio; predomina el Cambisol, con textura franca. La cubierta arbórea alcanza el 63 % de Gipuzkoa; el bosque caducifolio original (haya, roble) ocupa una extensión reducida (28 %) y compite con plantaciones de especies exóticas de rápido crecimiento (*Pinus radiata*, sobre todo). Estas especies fueron introducidas en la segunda mitad del siglo XX, en una apuesta por la forestación que incluyó también el abandono de pastos y su sustitución por esas especies que han llegado a ocupar el 40-50 % del espacio potencial del robledal. La expansión de estas plantaciones ha supuesto cambios en el paisaje, pero también en la propia gestión de las masas arbóreas que han afectado tanto el ciclo hidrológico de la cuenca como la exportación de sedimentos.

Se seleccionaron 20 cuencas distribuidas por Gipuzkoa, de diferentes tamaños y con distintos porcentajes para los principales usos considerados: vegetación herbácea, bosque nativo, plantaciones exóticas y otros. Todas las cuencas cuentan con control foronómico y de precipitaciones en la red hidro-meteorológica de la Diputación Foral de Gipuzkoa (<https://www.gipuzkoa.eus/eu/web/obrahidraulikoak/>). Se consideraron 10 años hidrológicos (2000-2011), con datos diarios de caudal.

Los resultados del estudio muestran que la gran influencia que el régimen de precipitaciones tiene sobre los caudales (medios, altos y bajos) enmascara los efectos hidrológicos de los diferentes tipos de cubierta vegetal. Sin embargo, estos efectos existen y es necesaria su consideración en la planificación hidrológica, y forestal, más aún en un territorio (Golfo de Bizkaia) situado en una zona de transición climática, y con un fuerte gradiente espacial de precipitaciones, que puede servir desde el presente para prever efectos futuros de cambios en las precipitaciones.

Así, la interacción entre los dos factores de cambio principales (precipitaciones y cubierta vegetal) permite establecer que una mayor presencia de bosque disminuye los aportes anuales (servicio hidrológico de aprovisionamiento), siendo la disminución más evidente cuando mayor es la presencia de plantaciones exóticas y mayor es la precipitación. Por otro lado, el potencial del bosque para reducir los caudales más elevados es bajo, si bien es mayor para cuencas con menores precipitaciones y mayor presencia de plantaciones exóticas; en cuencas con mayores precipitaciones, en cambio, el bosque nativo o los pastos sirven mejor a la reducción de los caudales más altos. En lo que a caudales bajos se refiere, las plantaciones exóticas tienen un ligero efecto positivo en cuencas con bajas precipitaciones, mientras que con altas precipitaciones los caudales bajos, sobre todo en invierno y primavera, se ven favorecidos por la mayor presencia de bosque nativo y pastos.

Este estudio evidencia que los servicios hidrológicos (en términos de caudal) están condicionados por los cambios en usos del suelo, y, lo que es más importante, que son muy dependientes de la precipitación anual. Por tanto, asegurar el servicio de provisión del recurso implica poner el foco en las medidas territoriales a tomar, a escala de cuenca, teniendo en cuenta las precipitaciones actuales y las previsiones, buscando la combinación de usos (mosaico) que mejor pueda garantizar los servicios hidrológicos.

Como se ha dicho, estas dos situaciones corresponden a los extremos oriental y occidental de los Pirineos, caracterizados por climas mediterráneo y atlántico, respectivamente. Es lógico pensar que a lo largo de la cordillera las situaciones pueden ser muy diversas, no solo debido a las condiciones climáticas del lugar (anual y estacional), sino también a las condiciones propias de la cuenca en cuestión (cota, que afecta a la presencia de la capa nivosas; relieve, geología, y, por supuesto, cubierta/uso del suelo). Es, por tanto, importante conocer las relaciones entre los términos esenciales del balance hídrico (P , ETR , Q) para la serie de datos disponibles, como diagnóstico de la situación y punto de partida para estimar los posibles escenarios hidrológicos futuros derivados del cambio climático y para establecer desde el presente las medidas territoriales adecuadas de adaptación, que van a pasar por la gestión adaptativa del territorio y, sobre todo, de los usos/cubiertas del suelo.

Para ello, es necesario considerar la separación de los efectos que el cambio climático, por sí mismo, y el cambio en la ocupación del suelo pueden tener en la cuenca. El cambio en el clima afecta, sobre todo, a la precipitación (P) y a la evapotranspiración potencial (ETP), mientras que el cambio en los usos del suelo afecta, sobre todo, a la evapotranspiración real (ETR), con diferentes situaciones estacionales según la localización

espacial de la cuenca. Así, la relación $(P-ETR)/ETP$ es indicativa de la eficiencia del sistema (cuenca) en el uso del agua disponible (excedente de agua, P_{ex}), y la relación $(ETP-ETR)/ETP$ lo es de la eficiencia en el uso de la energía (excedente de energía, E_{ex}). Es lo que Tomer y Schilling (2009) proponen como enfoque conceptual de desplazamiento ecohidrológico asociado al cambio en clima y en usos del suelo. Es el interés por focalizar el estudio de esa eficiencia en el largo plazo por lo que los autores se refieren a su enfoque como “ecohidrológico”.

La gestión de los usos del suelo y de la vegetación permite actuar sobre la evapotranspiración real (ETR), y tiene la capacidad de compensar la disminución climática de la disponibilidad en agua en espacios hidrológicamente sensibles del territorio.

La Figura 7.3 es de esos autores, modificada para centrar la cuestión en las políticas forestales (bosques, pastos) en zonas de montaña. Aunque los efectos del cambio climático no se limitan a los recogidos en la figura (pueden darse cambios en sentido contrario de la P y de la ETP), se puede admitir que ese cambio comporta incremento de la ETP , por aumento de la temperatura, independientemente de lo que pase con la P . De lo que se trata, desde el punto de vista de la Adaptación, es de compensar la posible disminución climática de la disponibilidad en

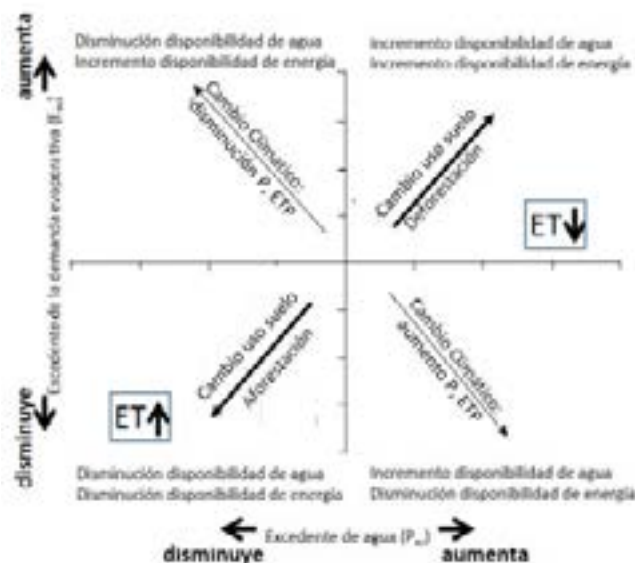


Figura 7.3. Enfoque conceptual de desplazamiento asociado a cambios en clima y en usos del suelo.

(Modificado de Tomer y Schilling, 2009).

Box 7.3. Micro-caso de estudio de las cabeceras de los ríos Llobregat y Ter (Pirineo catalán).

Gallart et al. (2011) llevaron a cabo un estudio en las cabeceras de estos dos ríos del Pirineo catalán (Barcelona, Girona). El clima es mediterráneo, con lluvias en primavera y otoño, e inviernos secos; los episodios nivosos son escasos y limitados a la zona de cumbres. La vegetación nativa es bosque caducifolio de robles, con arbustos perennes, si bien en las zonas más altas dominan pinos y hayas y también pastizales de altura, favorecidos por la actividad de pastoreo. Al igual que en otras zonas pirenaicas, la colonización humana modificó notablemente el paisaje original: la mayor parte de las zonas bajas y suaves se utilizaron para la agricultura, las tierras altas se deforestaron para aumentar las zonas de pasto y los bosques se utilizaron intensamente para obtener madera y combustible. El abandono de todas estas actividades se produjo en la cuenca después de mediados del siglo XX.

Se analizaron los registros históricos de caudales para el periodo 1940-2000 y se pusieron en relación con los cambios en el forzamiento climático y en la ocupación del suelo. Los registros de caudales mostraron una alta variabilidad interanual, con una sucesión de periodos húmedos y secos decenales, lo que dificultó la detección de tendencias a largo plazo en la mayoría de las estaciones de aforo. La comparación de los caudales medidos con los simulados por modelos hidrológicos mostró algunas divergencias claras. Las tendencias de los caudales medidos para el periodo de estudio fueron negativas, mientras que los explicados por el forzamiento climático no tenían prácticamente tendencia. Las diferencias encontradas entre los caudales observados y los simulados mostraron tendencias negativas que se atribuyeron a los cambios de uso del suelo.

En efecto, las montañas medias de las cuencas estudiadas habían sufrido un importante aumento de la cubierta forestal en las últimas décadas. El principal cambio observado fue en la cubierta del bosque, que pasó a ser más densa, y también el cambio de uso del suelo de agricultura a pastos. El efecto previsible de este cambio es un aumento de la evapotranspiración por el aumento de la cobertera forestal, que no se tuvo en cuenta en la modelización. La conclusión es que, aunque los caudales mostraron gran variabilidad decenal y tendencias significativas forzadas por el clima durante algunos periodos de escala decenal, los caudales modelizados para todo el periodo 1940-2000 no mostraron tendencias significativas. Por el contrario, los caudales reales mostraban una disminución anual de aproximadamente el 0,25% de los recursos medios anuales durante ese periodo de tiempo, debido al aumento de la cubierta forestal.

Precisamente sobre una de las cuencas estudiadas (Cardener, tributario del Llobregat), Gallart et al. (2013) proponen criterios de gestión de la cuenca con objeto de garantizar los recursos en agua. Afirman que es necesario desarrollar una nueva generación de planes de gestión de cuenca que tengan en cuenta adecuadamente las interacciones entre los distintos tipos de cubierta vegetal y los procesos hidrológicos. En el caso de la cuenca del Cardener (308 km²), los recursos han sufrido un descenso significativo del 22% entre 1950 y 2000, porcentaje similar al de aumento de la cubierta forestal que acompañó el abandono rural. Si bien en ese periodo los datos climáticos no mostraron tendencias claras, las previsiones apuntan a un aumento de la temperatura y a una cierta reducción de la precipitación, sobre todo en verano, lo que favorecerá la expansión del bosque en altitud y la sustitución de especies en bajas altitudes. Por tanto, se prevé una disminución apreciable de los recursos hídricos, principalmente en las áreas donde la ET está limitada por la energía disponible.

Así, ante la alternativa de regeneración natural de campos abandonados, “la gestión forestal de la cuenca debería tener como objetivo la disminución del consumo natural de agua, con el fin de compensar en el futuro la esperable reducción de recursos hídricos” (esta cuenca es una de las fuentes de agua de la ciudad de Barcelona). En esta línea, los autores proponen “recuperar escenarios de uso y cubierta del suelo del pasado reciente”: cambio permanente de algunas áreas de bosque a pasto o cultivo herbáceo, y, por otro lado, reducción de la duración del ciclo de tala de las explotaciones forestales. Según sus estimaciones, la conversión de bosque en pastizal representaría, con el clima actual, un aumento de unos 0,13 hm³ anuales por km² en las partes altas de la cuenca y de unos 0,08 hm³ en las bajas.

Concluyen afirmando que las actuaciones propuestas no serían rentables por sí mismas, sino que su viabilidad económica “requeriría compensaciones por el aumento de los aportes de agua en la cuenca, o pago por servicios ecosistémicos”. No obstante, estas actuaciones “deberían evitarse en las áreas de la cuenca propensas a procesos erosivos y a deslizamientos de terreno”, en las que, obviamente, la prioridad de actuación debe ser otra. Este esquema de actuaciones, con prioridades espaciales diferentes, entra dentro de la idea de mosaico de usos del suelo que propone este capítulo.

agua en espacios hidrológicamente sensibles del territorio mediante medidas de incidencia territorial que tienen que pasar, sin duda, por cambios en los usos y gestión de la vegetación, tendentes a reducir la ETR. Si no se tiene en cuenta esto se podría llegar a una gestión del territorio, ajena a lo adaptativo, cuyas consecuencias se sumen a las del cambio climático propiciando disminuciones inaceptables a futuro de la disponibilidad en agua en esos espacios.

Es aquí donde adquiere un mayor sentido, si cabe, la Hidrología Forestal como ámbito de conocimiento de la relación Bosque-Agua. Según Calder (2007), una de las mayores referencias en este dominio, aunque la hidrología forestal ha tenido importantes avances en los últimos años, el conocimiento científico no siempre ha alcanzado el dominio de la política forestal, y añade que los programas forestales suelen estar dirigidos, sobre todo, a aspectos relacionados con la biodiversidad, el secuestro de carbono, la producción de madera, los beneficios lúdicos... pero no siempre se tienen en cuenta los efectos sobre los recursos hídricos. El autor enfatiza el hecho de que la percepción que, sobre los beneficios aportados por los bosques, suele tener la opinión pública no en todos los ámbitos se corresponde con las evidencias científicas, poniendo el foco en la función hidrológica de los bosques.

Obviamente, las medidas concretas tienen que ser intrínsecas a la cuenca considerada, ya que, como se ha comentado, las condiciones de partida, tanto las externas al territorio (clima) como las internas (vegetación, sobre todo), pueden ser muy diferentes de una región a otra de los Pirineos, de ahí la necesidad de contar con diagnósticos adecuados como punto de partida. La complejidad asociada a la escala espacio-temporal

de los procesos ecohidrológicos y la incertidumbre asociada a la evolución de las medidas a tomar sólo pueden gestionarse desde el propio territorio, con sus agentes y sus conocimientos integrados para la adaptación.

7.2.2 Estrategias de adaptación

Poner en valor los recursos hídricos de un territorio (cuenca), y asegurar su disponibilidad espacio-temporal, supone actuar directamente sobre el territorio (cubierta, usos y gestión del suelo), sobre todo en aquellos espacios en los que los procesos hidrológicos condicionan esa disponibilidad. Hablamos de gestión adaptativa del territorio con enfoque hidro-ecosistémico, como estrategia clave para las medidas de adaptación al cambio climático.

El esquema de la Figura 7.4 recoge los aspectos comentados en este capítulo. Trata de ser una hoja de ruta para la adaptación al cambio climático desde la perspectiva hidrológica. El punto de partida es el Agua como eje de la Adaptación, y la gestión del Territorio como causa añadida o amortiguación de efectos del cambio, según cómo se gestione su funcionalidad hidrológica.

Como esencia de este reto está la consideración de los servicios hidrológicos (SH) como parte fundamental de todos y cada uno de los servicios ecosistémicos (SE): provisión, regulación, soporte de ecosistemas, y cultural (ligado a la percepción del paisaje). Poner el foco en los servicios hidrológicos del territorio implica, necesariamente, poner en valor el Suelo como distribuidor de las precipitaciones (P). El Suelo es el medio de enlace entre el clima y el territorio,

y su capacidad de retener agua (humedad del suelo) condiciona los términos básicos del balance hídrico: Caudal (Q , agua azul) y Evapotranspiración (ET, agua verde). Estos términos se limitan mutuamente, sea en las P actuales o en las venideras, de manera que ambos deben ser parte de la planificación hidrológica.

Se propone enfocar la adaptación al cambio climático desde la perspectiva hidrológica, considerando los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica.

Pero planificar la ET es planificar el suelo del territorio, fundamentalmente en lo que concierne a las distintas formas de ocuparlo y gestionarlo. La viabilidad económica de los recursos del territorio y la sostenibilidad ambiental de una región no pueden poner en riesgo la seguridad hídrica, más aún en situaciones de cambios inciertos y complejos.

De ahí la necesaria visión Cuenca del territorio, considerando (conservando, recuperando) la funcionalidad hidrológica de cada una de sus partes (el río como consecuencia de la cuenca), en

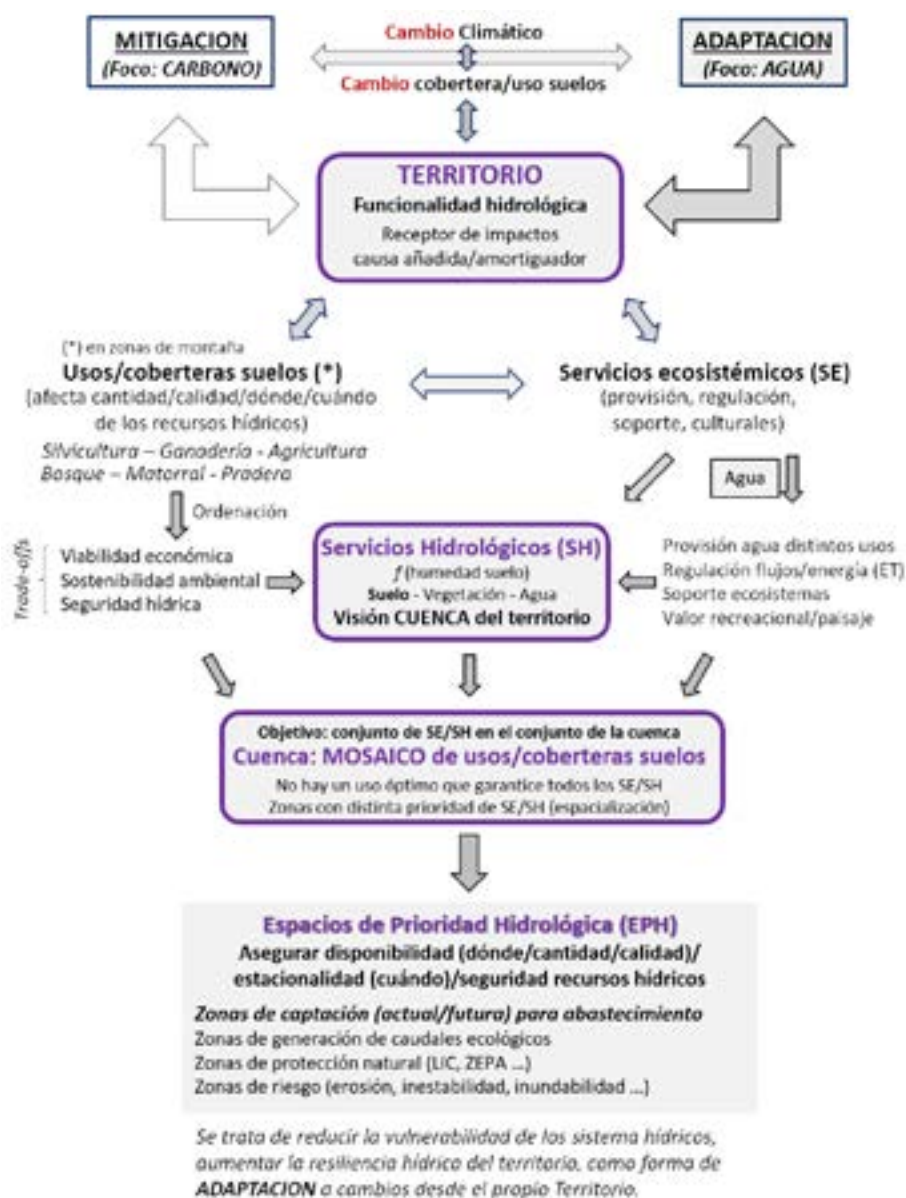


Figura 7.4. Esquema conceptual para la consideración de los servicios hidrológicos y la delimitación de Espacios de Prioridad Hidrológica en la planificación territorial orientada a su funcionalidad hidrológica.

(Fuente: elaboración propia.)

el contexto de asegurar el conjunto de servicios ecosistémicos en el conjunto de la cuenca.

La clave para la adaptación desde los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica es la delimitación de Espacios de Prioridad Hidrológica (EPH) como ámbitos cuya prioridad es la de asegurar la disponibilidad de los recursos hídricos en cantidad (cuánto), calidad (cómo), lugar (dónde) y momento (cuándo).

Ahora bien, no existe un uso óptimo del suelo que garantice, a la vez, todos los servicios ecosistémicos, e hidrológicos, por lo que es necesario establecer, con base científica, distintas prioridades en distintas zonas, con distintas combinaciones de usos: territorialización de los servicios: el territorio como mosaico de usos.

Es en esta línea que se propone el establecimiento, y delimitación, de los Espacios de Prioridad Hidrológica (EPH), ámbitos territoriales cuyo objetivo fundamental debe ser asegurar la disponibilidad de los recursos hídricos en cantidad (cuánto), calidad (cómo), lugar (dónde) y momento (cuándo). Y para ello resulta clave la elección y gestión de la cubierta vegetal, más aún cuando la silvicultura al uso está pasando, en algunas regiones pirenaicas, al menos, una época de crisis económica.

Aunque la disponibilidad hídrica que pretenden garantizar los EPH puede servir a distintos fines, en este capítulo nos referimos principalmente a las captaciones de agua (superficial o subterránea, sea cual sea la escala), que hay que considerar como socialmente estratégicas, y cuya preservación futura en condiciones adecuadas es clave para la adaptación de las comunidades pirenaicas. Otros fines a considerar son los de generación de caudales en zonas de especial protección, el control de flujos en zonas de riesgo (erosión, inestabilidad), el control de humedad del suelo en zonas productivas, etcétera.

7.3 El caso de estudio de la cuenca del Bidasoa (Navarra)

La Cuenca del Bidasoa está situada en el extremo occidental de la Cordillera Pirenaica (Figura 7.5), y comprende un área aproximada de 681 km² (hasta la estación de aforos de Endarlatsa, límite con Gipuzkoa).

La cuenca presenta unas altitudes comprendidas entre 17 y 1306 metros sobre el nivel del mar. La dureza de las rocas que constituyen gran parte del territorio ha dado lugar a relieves abruptos de acusada pendiente. En la cuenca del Bidasoa afloran materiales geológicos muy diversos, dispuestos en complejas estructuras tectónicas, generando afloramientos muy compartimentados. Los suelos desarrollados sobre estas litologías son predominantemente de textura franco-limosa y franco-arcillosa que varían en espesor de los escasos 5-20 cm en las laderas hasta los 3 metros en zonas de menor pendiente.

El cauce principal, río Bidasoa, tiene una longitud total de 66 km. Nace en el valle del Baztan (Navarra), donde lleva una dirección predominante este-oeste, hasta llegar a la confluencia con su principal afluente, el Ezkurra, donde la dirección del Bidasoa gira repentinamente hacia el norte. Desemboca en Hondarribia (Gipuzkoa), aunque es en la estación de aforo de Endarlatsa (límite Gipuzkoa-Navarra) donde se controlan las salidas de agua de la cuenca (Figura 7.5).

El clima se define como templado y húmedo de tipo oceánico. La precipitación media de la cuenca para el periodo 1980-2006 fue de 1700 mm/año, la temperatura media anual de 13,5 °C y la evapotranspiración media de 730 mm/año. Durante ese mismo periodo la aportación de la cuenca en Endarlatsa fue de 850 hm³/año. Mediante el balance hídrico realizado con el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) para el periodo 2000-2017 se estimó una ETR casi del 30%. De los aportes al río un 66% es de agua subterránea y subsuperficial, siendo la escorrentía superficial el restante 34%.

La vegetación potencial de la cuenca del Bidasoa (bosque de frondosas donde dominan las hayas, los robles y los fresnos) se ha visto alterada por la actividad humana. Actualmente, en la mitad norte de la cuenca predomina la cubierta forestal (frondosas y coníferas), mientras que, en la

parte meridional, y sobre todo en la comarca del Baztan (SE de la cuenca, Figura 7.5) existen importantes superficies de pastos dedicados a la ganadería extensiva.

7.3.1 Factores sociales y económicos

En la cuenca de río Bidasoa existen 19 municipios (Arantza, Baztan, Bera, Bertizarana, Donamaria, Donestebe/Santesteban, Elgorriaga, Eratsun, Etxalar, Ezkurra, Igantzi, Ituren, Labaien, Lesaka, Oitz, Saldias, Sunbilla, Urrotz y Zubieta). Los núcleos urbanos más significativos son Bera, Lesaka, Sunbilla, Donestebe/Santesteban y Elizondo (Baztan).

Actualmente en la cuenca están censados 21080 habitantes. Durante el siglo XX se dio una pérdida de población constante; sin embargo, el comienzo del milenio trajo consigo un cambio de tendencia que terminó con la crisis económica de 2012. En la actualidad solo Donestebe/Santesteban, Bera, Lesaka y Elgorriaga tienen mayor población que en 1930. Durante ese periodo el resto de los municipios de la zona del Bidasoa, todos ellos de menos de mil habitantes, han perdido entre el 40% y 70% de su población, y los del Baztan han perdido el 24% de su población (INE, 2019).

Si consideramos las actividades económicas, la mayor parte de los establecimientos existentes en la cuenca son del sector servicios (70%), seguido por el de la construcción (15%), la industria (11%) y por último el primer sector (4%). Todos los sectores excepto el de la industria han sufrido una pérdida de establecimientos desde 2012 hasta la actualidad (NASTAT, 2020). La industria se distribuye por muchas localidades, aunque principalmente lo hace en las localidades de mayor población. En general, en la cabecera de la cuenca existe poca industria mientras que en zonas más bajas aparecen más núcleos industriales (Lesaka, Bera...).

En el sector agrícola, los cultivos de secano son predominantes, es más, la superficie de tierras labradas, sobre todo en la ribera del río, ha aumentado en las últimas dos décadas. El cultivo

de regadío en la cuenca es casi insignificante. Existen pequeñas concesiones de agua de riego, pero son cantidades muy pequeñas que, sobre todo, están vinculadas a huertas de autoconsumo o de pequeña producción. En este sentido, Donestebe y Saldias son una excepción ya que aproximadamente el 6% de sus cultivos son de regadío. Respecto a la ganadería destaca Baztan, siendo el municipio con mayor ganadería ovina, porcina y vacuna. La superficie ocupada por las explotaciones agrícolas y ganaderas en el municipio de Baztan es casi el 46% de la superficie total que ocupan las explotaciones de toda la cuenca. Durante el periodo 1999/2009 en todos los municipios ha disminuido el número de explotaciones y, con ello, la superficie dedicada a actividades agrícolas o ganaderas. Lesaka, Oitz, Labaien, e Ituren son, en ese sentido, una excepción en el área de estudio, ya que la superficie dedicada a estas actividades ha aumentado.

7.3.2 Sistemas de abastecimiento

Según el Plan Director del Ciclo Integral del Agua de Uso Urbano de Navarra (2019) la cuenca de estudio se puede dividir en dos zonas de abastecimiento principales, la Zona de Bidasoa y la Zona de Baztan Urdax-Zugarramurdi.

En la Zona de Bidasoa, los municipios de Sunbilla, Santesteban, Elgorriaga, Ituren y Zubieta se abastecen de una solución conjunta dentro de la Mancomunidad de Malerreka, aunque mantienen sus manantiales antiguos. El resto de municipios, en unión con otros o de forma unitaria, mantienen soluciones de abastecimiento independientes. El consumo de agua de abastecimiento conectado a red en la zona es de 2,3 hm³/año, la mayor demanda es urbana (0,6 hm³/año) seguida de la industrial (0,2 hm³/año). Sin embargo, el agua no registrada es de 1,4 hm³/año, es decir el 63,1% del agua de abastecimiento (Plan Director del Ciclo Integral del Agua de Uso Urbano de Navarra, 2019; datos para el periodo 2010-2015).

En la zona de Baztan-Urdax-Zugarramurdi

se encuentran 5 municipios. Sin embargo, los municipios de Urdax y Zugarramurdi se sitúan fuera de la cuenca por lo que en este informe se hablará tan solo de la Zona de Baztan. El ayuntamiento de Baztan no cuenta con una entidad de gestión común, sino que cada uno de los lugares tiene sus manantiales propios, algunos de ellos con problemas de legalidad en la concesión, sin contadores ni en los depósitos ni en las propias viviendas. Respecto al consumo de agua de red, el consumo es de 2,3 hm³/año (doméstica 0,4 hm³/año, industrial 0,2 hm³/año y otros, usos en los que se incluye la agricultura y la ganadería, 0,3 hm³/año). Al igual que en la zona del Bidasoa, la cantidad de agua no registrada es muy alta, 1,3 hm³/año, es decir, el 60% del agua de abastecimiento. (Plan Director del Ciclo Integral del Agua de Uso Urbano de Navarra, 2019; datos para el periodo 2010-2015).

En el caso del Bidasoa, las captaciones de agua juegan un papel importante porque existen hasta 145 distribuidas por toda la cuenca (Figura 7.6). Las captaciones en ríos o regatas son 28, 12 de ellas están destinadas a desaparecer, 1 a modificar y 15 son definitivas. Existen otras 16 captaciones catalogadas como “desconocido”. En algunos casos se refieren a pozos como el de Lesaka que abastece a Lesaka y a Bera, captaciones en minas y en centrales hidroeléctricas. Debido a

que los acuíferos de la cuenca son de carácter local, existen 101 captaciones en manantiales. 11 de éstas captaciones están fuera de uso para el abastecimiento de la población, 52 se prevé que desaparezcan, 4 se modificarán y son 34 las captaciones en manantiales que a día de hoy se consideran definitivas.

Evidentemente, la cantidad, calidad y localización de los manantiales depende de la geología de la zona. La variedad litológica de los materiales existentes y la compleja tectónica de la zona, condicionan la existencia de un gran número de acuíferos, en general poco significativos, debido a la poca permeabilidad del substrato rocoso dominante, aunque con cierta importancia a escala local. La parte septentrional de la cuenca está dominada por materiales Paleozoicos (alternancia de pizarras y areniscas esquistasas y en menor medida calizas y dolomías, Figura 7.6). En esta zona, se prevé que muchas de las captaciones en el río Bidasoa y en sus afluentes desaparezcan. Los manantiales que aparecen en esta zona no están ligadas a los materiales paleozoicos sino a los depósitos cuaternarios, de mucha menor dimensión y sin conexión entre ellos.

El suroeste de la cuenca (río Ezkurra) está fundamentalmente formada por materiales



Figura 7.5. Situación geográfica de la zona de estudio, los municipios que la componen, la red hidrográfica y la subdivisión de la cuenca por zonas de abastecimiento (zona de Bidasoa y zona de Baztan).

(Fuente: elaboración propia.)

Mesozoicos (calizas y dolomías del Jurásico, y calizas, arcillas, areniscas y conglomerados cretácicos). En esta zona existen numerosas captaciones definitivas sobre todo en ríos y regatas. Los manantiales definitivos, están ligados a depósitos cuaternarios. Es relevante la cantidad de manantiales que existen en materiales triásicos (colores morados en la Figura 7.6) y en basaltos paleozoicos. Se prevé que la mayor parte de estos manantiales desaparezcan. Por último, en el sureste de la cuenca hay una serie de manantiales que fundamentalmente están ligados a contactos tectónicos o límites entre distintas litologías.

7.3.3 Planificación territorial, desde 1956 hasta 2019

Para cuantificar la importancia de la función hidrológica del Territorio y conocer mejor la influencia de la vegetación en las funciones hídricas de los suelos, se instalaron una serie de sensores de monitorización de humedad en continuo en la zona de Saldias. La ubicación de cada parcela fue seleccionada de manera que fuera representativa de los principales tipos de vegetación de la cuenca. De este modo, las estaciones de medición se ubicaron en cuatro parcelas de diferentes usos: un pinar (*Pinus radiata*), un robleal (*Quercus rubra*), un prado mesófilo y un helechal (*Pteridium aquilinum*). En todas las parcelas se instalaron sensores de humedad del suelo a tres profundidades: 20, 45 y 80 cm, y junto a una de ellas una estación meteorológica automática.

Hasta la fecha se han recabado y almacenado series de datos veinte minútales de humedad en cada parcela por un periodo de casi tres años (desde julio de 2018 hasta la actualidad). La Figura 7.7 muestra la dinámica de la humedad del suelo en todos los perfiles. El estudio de la evolución de la humedad en cada parcela muestra que la dinámica del agua en los suelos es diferente bajo diferentes cubiertas forestales, tanto en superficie como en profundidad. Mientras que en el prado se ven mayores variaciones de humedad, las cuales reflejan perfectamente los patrones de lluvia registrados en la estación meteorológica, en las parcelas bajo cubierta forestal las variaciones

de humedad aparecen más atenuadas. Además, el suelo bajo el prado retiene más agua que el forestal, donde la infiltración a capas profundas es más rápida. En el helechal, la influencia de la precipitación está muy atenuada en comparación con los demás usos del suelo. Estos resultados son consistentes con el sistema radicular de cada parcela, lo cual indica que la vegetación es un factor influyente no solo en superficie, sino también en profundidad.

Las características de la vegetación, junto con las de los suelos, son un factor hidrológico a considerar en la ordenación del territorio con perspectiva hidrológica.

Además, esta dinámica ha resultado ser coherente con los datos de la caracterización física correspondiente a cada horizonte del suelo, especialmente los parámetros de conductividad hidráulica saturada, densidad aparente y porosidad del perfil de cada parcela.

Una vez vista la importancia hídrica de los usos del suelo, para conocer mejor la evolución histórica de estos usos, se describen los cambios más significativos en los usos del suelo ocurridos desde 1956 hasta la actualidad en la cuenca del Bidasoa. La mayor parte de la información que aquí se expone se ha obtenido del documento Evolución temporal de los usos del suelo en la cuenca del Bidasoa realizado en el marco del proyecto PIRAGUA.

Como nota aclaratoria, la clase Forestal no arbolado que se utiliza en este documento, se refiere a pastizales, matorrales y helechales. Los Cultivos, en la cuenca del Bidasoa, son sobre todo cultivos herbáceos de secano (trigo, espárragos...) y cultivos leñosos de secano (frutales...). La clase Frondosas está constituida fundamentalmente por Hayedos, pero también por robleales, castaños... Por último, la clase Improductivo se refiere a zonas urbanas, afloramientos y zonas inundables.

Evolución 1956-1990

La gran mayoría de la superficie de la cuenca del Bidasoa (97,61%) en 1956 correspondía a uso forestal. En algo más de tres décadas, las superficies forestales disminuyeron levemente (92,37%) transfiriendo el uso de estas áreas a

cultivos agrícolas, clase cuya área dedicada pasó de ocupar el 1,24% de la cuenca al 7,21%. Dentro de las clases forestales, las superficies clasificadas como Forestal no Arbolado y Frondosas disminuyeron. Esta disminución se refleja en el aumento de las Coníferas.

Evolución 1990-2000

En este periodo, al igual que en el anterior, la superficie dedicada al uso forestal disminuye pasando de un 92,36% de la superficie total de la cuenca a un 83,39%. La causa directa de este fenómeno es la disminución acusada de la clase Forestal no arbolado. Siguiendo con la tendencia identificada en el periodo 1956-1990, la superficie de la clase Cultivos agrícolas se duplica alcanzando un casi un 15% de la superficie de la cuenca. El aumento del área de la clase Improductivo fue de un 314,62%.

Evolución 2000-2007

En el año 2000 las clases Frondosas y Forestal no arbolado ocupaban el 73,66% de la superficie de la cuenca, registrando 30.320,33 ha y 19.277,99 ha respectivamente. En cuanto a la variación de la superficie de las clases más extendidas, la Frondosa aumentó levemente 6,27%, mientras que la superficie dedicada al Forestal no arbolado disminuyó un 9,83%. Desde 1956 la superficie dedicada a los cultivos registró un aumento considerable, pues bien, en este periodo empezó a perder superficie, 2,35%.

Evolución 2007-2012

En el periodo 2007-2012 no se detectaron grandes cambios de uso.

Evolución 2012-2019

Durante este periodo los cultivos aumentaron

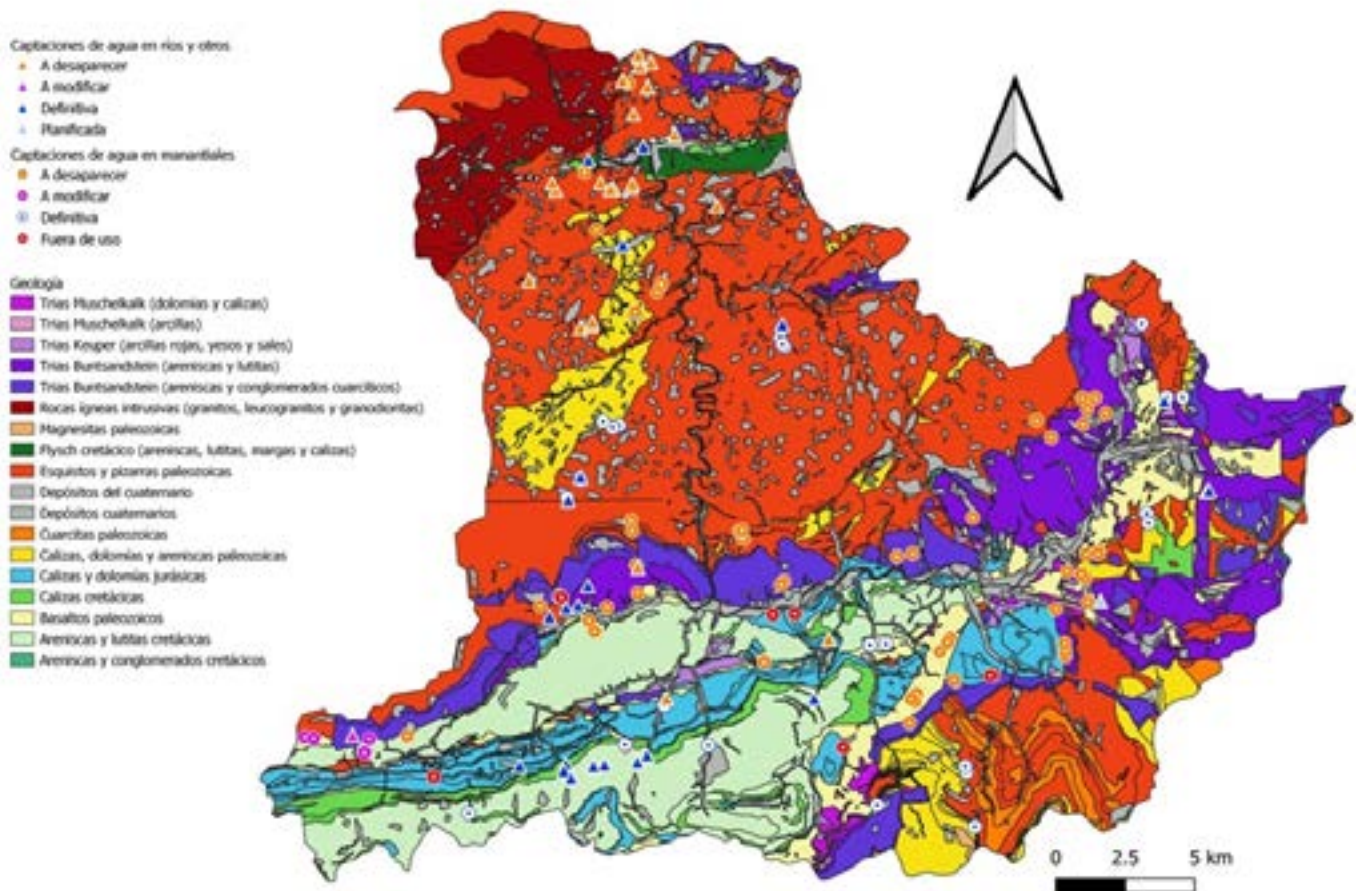


Figura 7.6. Geología de la cuenca del Bidasoa y localización y tipo de las captaciones de agua.

(Fuente: <https://idena.navarra.es> y Gobierno de Navarra).

su superficie, sobre todo los cultivos leñosos de secano, su dedicación pasó de ser de 29,80 ha a 62,49 ha. Por primera vez se da un cambio de tendencia en la variación de la superficie dedicada a Coníferas, ésta desciende un 18,44%, 1086,88 ha. Los usos Forestal no arbolado, Frondoso e Improductivo aumentaron ligeramente.

Resumiendo, el uso del suelo más extendido en el siglo XX fue el Forestal no arbolado y Frondosas. La superficie ocupada por este uso fue disminuyendo hasta el año 2007 donde se estabilizó. El área perdida de la clase Forestal no arbolado se transformó principalmente en Frondosas, provocando su aumento de superficie desde el año 2000 hasta hoy en día.

En el estudio realizado en el marco del proyecto PIRAGUA que lleva por título “Radiografía socioeconómica y situación de los pastizales en Baztan, Malerreka y Bortzirriak” se ha desgregado la clase Forestal no arbolado de tal forma que se ha estudiado la evolución de los pastizales, las praderas y los matorrales. Desde 1956 hasta el 2019 es muy significativo el descenso de los pastizales que han pasado de ocupar el 25,6% de la cuenca al 3,8%. Al contrario, las praderas han aumentado, en 1956 ocupaban el 3,7% de la cuenca, mientras que hoy en día ocupan el 10,7%. El uso clasificado como Coníferas apenas tenía presencia en 1956, esta presencia fue aumentando hasta el año 2007 cuando empezó a disminuir lentamente. Al igual que

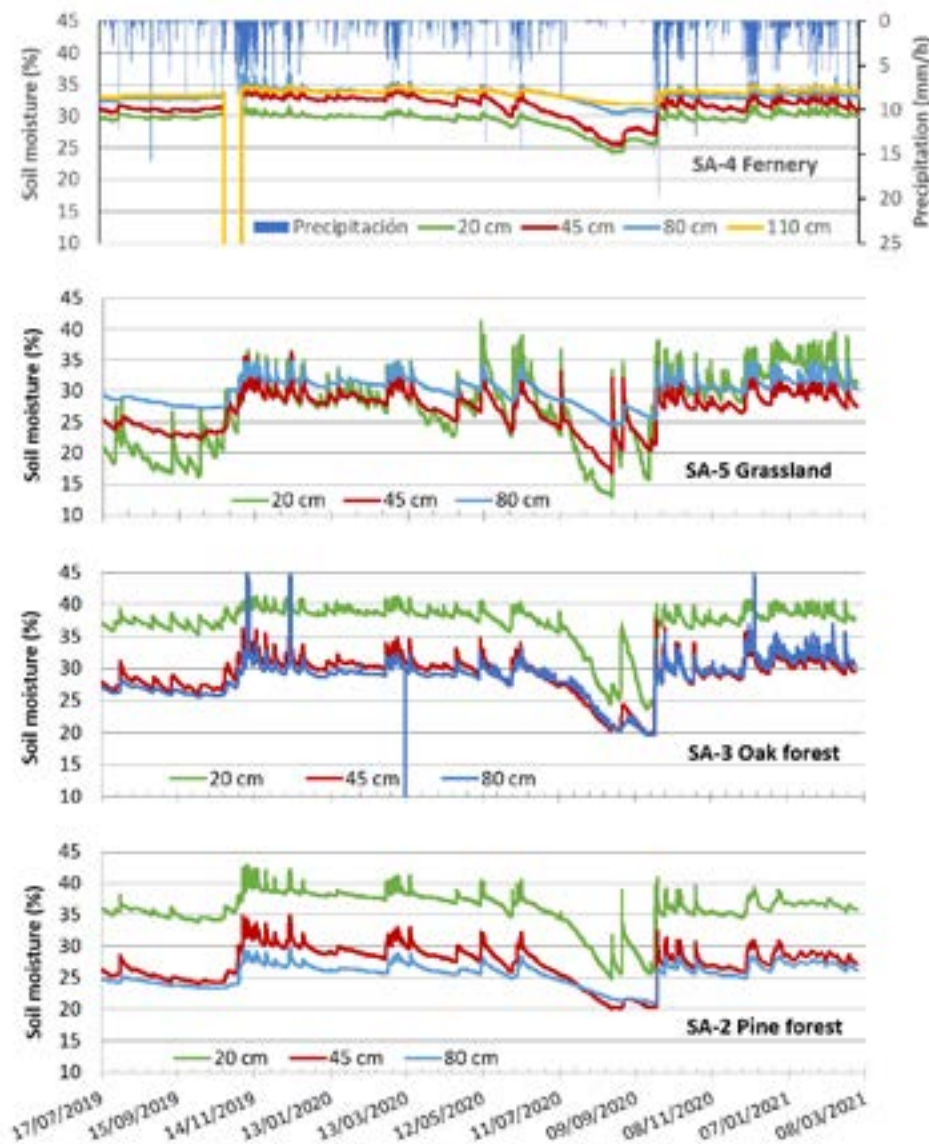


Figura 7.7. Serie de datos en continuo de la evolución de humedad del suelo en el perfil de cada parcela (helechal, prado, robleal y pinar) y datos de precipitación registrados en la estación meteorológica. La humedad se expresa en contenido volumétrico de agua (%) y la precipitación en mm/hora.

(Fuente: elaboración propia.)

la clase Coníferas, la superficie dedicada a Cultivos agrícolas en 1956 era muy pequeño, ésta aumentó considerablemente en el siglo XX llegando casi a 10.000 ha de superficie, esta cifra se ha mantenido en el siglo XXI. La superficie dedicada a Improductivo también creció a lo largo del siglo XX, en el 2007 se registra la estabilización de esta clase.

El proyecto LIFE NAdapta publicó la categorización de los polígonos del Mapa Forestal Español (MFE) 1:25.000 según su vulnerabilidad potencial relativa al cambio climático, estimada a partir del índice de sensibilidad de las especies forestales, los índices térmico y ombrotérmico medios de cada polígono del MFE actuales y predichos según las proyecciones regionalizadas de cambio climático de AEMET bajo un escenario intermedio. Las masas forestales identificadas con alta y muy alta vulnerabilidad se sitúan a lo largo del límite sur y en la zona centro de la cuenca, de forma que la especie predominante en las zonas identificadas con vulnerabilidad muy alta o alta es *Fagus Sylvatica*, el haya común.

7.3.4 Definición de Espacios de Prioridad Hidrológica (EPH) en la cuenca del Bidasoa

Para definir los EPH de la cuenca del Bidasoa, se han tenido en cuenta todos aquellos emplazamientos que proporcionan algún tipo de servicio hídrico, tanto a los habitantes de la cuenca como a los ecosistemas de la zona, dando especial relevancia a los sistemas de abastecimiento. Por ello, se han considerado:

- Las captaciones catalogadas como captaciones en ríos o regatas, desconocidas y manantiales. No solo se han tenido en cuenta las definitivas, sino también las que se espera que se modifiquen y las que se prevé que desaparezcan (Figura 7.6). Se ha optado mantener las captaciones que van a desaparecer porque en ocasiones este tipo de captaciones se suelen utilizar en épocas de sequía como añadido al suministro habitual.
- Las masas de agua de uso recreativo que declara la Directiva 76/160/CEE, que incluye zonas declaradas para aguas de baño. En el caso de la cuenca del Bidasoa no hay ninguna.
- Las masas de agua relacionadas con zonas protegidas. En la Figura 7.8 se muestran los espacios naturales protegidos y los espacios de protección de la fauna en la cuenca del Bidasoa.

Una vez definidos los EPH más significativos de la cuenca, el siguiente paso es delimitar su área de influencia. En el caso de los espacios protegidos se ha considerado su propia delimitación. En el caso de las captaciones, se ha delimitado su cuenca de drenaje puesto que cualquier cambio en esta área puede afectar a la cantidad, calidad y disponibilidad espacio-temporal del recurso en la captación. Esta delimitación se ha realizado utilizando un Modelo Digital del Terreno con una resolución de 2x2 m.

El siguiente paso ha sido calcular el área y el uso del suelo de los EPH en la cuenca del Bidasoa. A modo de ejemplo se muestra la Figura 7.9 en la que se pueden ver en gráficos circulares el porcentaje de uso de suelo de la cuenca de drenaje de cada captación, en este caso de los manantiales. Así pues, se han calculado los porcentajes de usos de suelo correspondientes a las cuencas de las captaciones y los espacios naturales protegidos (Tabla 7.1).

Los resultados muestran que los EPH relacionados con las captaciones ocupan un 25% de la cuenca. Si comparamos la zona de Baztan con la del Bidasoa la diferencia más notoria es la de las coníferas, puesto que en los EPH del Baztan prácticamente no tienen presencia (1%), mientras que en la zona de abastecimiento de Bidasoa ocupan un 12%. Los espacios naturales protegidos y los espacios de protección de la fauna ocupan el 31% de la cuenca. Por lo tanto, el área total de EPH en la cuenca es muy extensa (más de la mitad de la cuenca). Tal y como se ha visto a lo largo del documento, desde el año 2000 hasta la actualidad los pastizales han ido disminuyendo y aumentando las praderas y las Frondosas.

Esto indica un cambio de tendencia que desde un punto de vista de servicios hidrológicos y, por tanto, de recursos hídricos, puede tener consecuencias. Más aún si tenemos en cuenta

que los acuíferos que abastecen a la población (captaciones en manantiales) son vulnerables a los cambios, tanto climáticos como de uso del suelo, debido a que son pequeños y de carácter



Figura 7.8. Espacios naturales protegidos y espacios de protección de la fauna en el Bidasoa.

(Fuente: Infraestructura de datos espaciales de Navarra.)

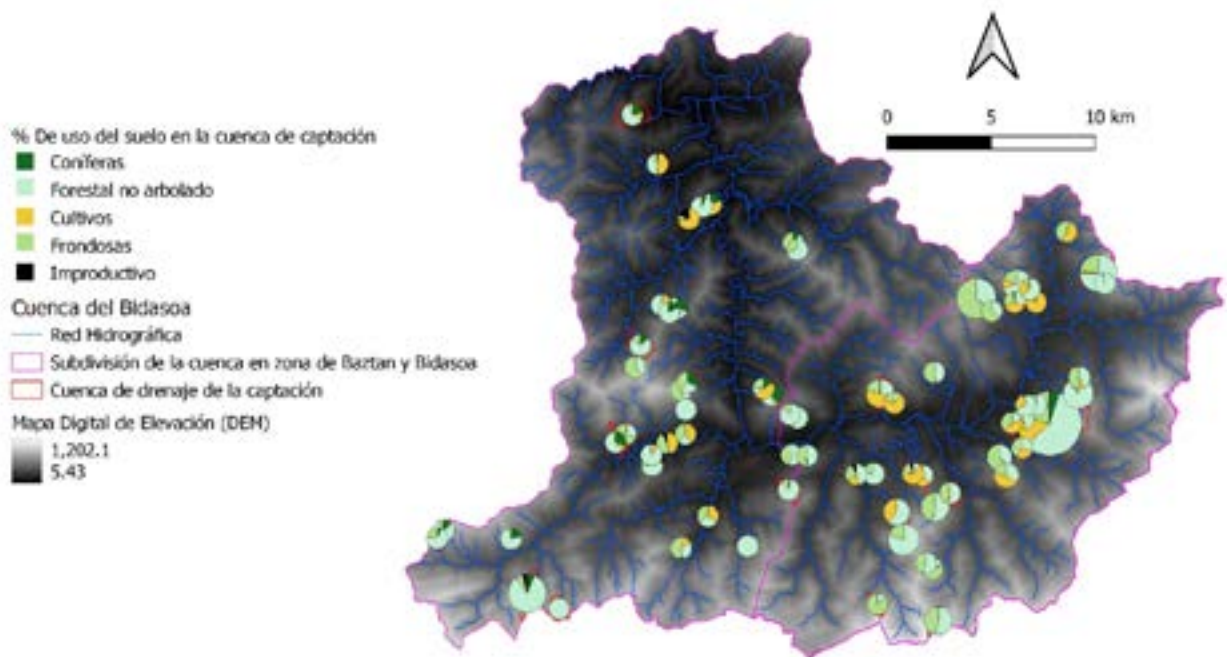


Figura 7.9. Cuencas de drenaje de los manantiales del Bidasoa. Gráficos circulares con la representación del porcentaje de uso del suelo de cada una de ellas. El tamaño del diagrama es indicativo del área de la cuenca de drenaje, cuanto mayor sea ésta, mayor es el diagrama. También se ha representado el relieve (DEM), la red de drenaje y la subdivisión en zonas de abastecimiento (zona de Baztan a la derecha y zona de Bidasoa a la izquierda).

(Fuente: elaboración propia.)

Tabla 7.1. Superficie total y desglosada por usos del suelo que ocupan las cuencas de drenaje de las captaciones (Espacios de Prioridad Hidrológica, EPH), y los espacios naturales protegidos en cada una de las zonas de explotación (zona de Baztán y zona de Bidasoa) y en el total de la cuenca del Bidasoa.

Uso del suelo	Captaciones (EPH)						Espacios Naturales	
	Zona de Baztán		Zona de Bidasoa		Total Cuenca		Total Cuenca	
	Km2	%	Km2	%	Km2	%	Km2	%
Improductivo	0,34	0,57	1,03	0,96	1,36	0,82	4,42	2,13
Fronosas	17,29	29,3	23,82	22,3	41,11	24,79	67,64	32,56
Forestal no arbolado	35,04	59,4	60,42	56,57	95,46	57,58	116,19	55,94
Cultivo	5,76	9,77	8,83	8,27	14,6	8,8	16,75	8,06
Coníferas	0,57	0,96	12,71	11,9	13,28	8,01	2,71	1,3
Total	58,99		106,81		165,81		207,71	

local. Por tanto, este cambio de tendencia y el aumento de la masa forestal puede afectar a los servicios hídricos. El abandono de zonas de cultivo puede tener un efecto similar. Por tanto, en la planificación del territorio es absolutamente necesario considerar los servicios hidrológicos que aportan estos EPH.

7.3.5 Percepción social sobre los servicios hidrológicos del territorio

Se ha realizado una encuesta a personas vinculadas con la temática expuesta en este informe (trabajadores del primer sector, técnicos ambientales en empresas privadas y en la administración, cargos políticos del Gobierno de Navarra, y prensa especializada). Se les ha preguntado por la cantidad de agua en la Cuenca y la mayoría han coincidido en decir que hay mucha pero que en época estival puede haber escasez. Respecto a la calidad, la percepción de la mayoría es que es buena, aunque algunas personas se muestran preocupadas por su calidad futura. Al preguntarles si ven variaciones (comparativa respecto al pasado) muchas han insistido en la idea de que cada vez más manantiales se secan en época estival y en que el consumo urbano ha aumentado.

Todas apuntan que el clima cada vez es más extremo, pero no todas lo asocian a la menor cantidad de agua. Al preguntarles qué medidas se pueden tomar para paliar los impactos del clima en los recursos hídricos, la mayoría coinciden en la necesidad de un consumo más responsable, algunas en la necesidad de una buena red de observación y tan solo una apunta a la planificación en la ordenación del territorio como una medida que puede servir para mejorar la cantidad y la calidad de los recursos hídricos.

Aunque la encuesta ha sido limitada en personas, si bien selecta en su elección, y aunque no tiene validez sociológica, sirve, al menos, para tener una impresión interesante sobre la percepción que gente de la cuenca, de determinados ámbitos relacionados con el agua, el territorio y el cambio climático, tiene sobre la temática. Y en nuestro caso, se desprende una falta de conocimiento de los procesos naturales que condicionan el ciclo del agua en la cuenca, más aún en su relación con la ocupación del territorio. Este hecho muestra la gran necesidad existente de informar adecuadamente a la sociedad, empezando por los sectores más “afectados”, y considerar la socialización del conocimiento como una medida más de adaptación a los cambios en curso.

7.3.6 Propuesta de acciones de adaptación

Como medidas a tomar en la cuenca desde el punto de vista de la gestión adaptativa señalamos las siguientes:

Medidas de adaptación: La delimitación de los Espacios de Prioridad Hidrológica (EPH) de todas las captaciones, incluidas las que se mantendrían como apoyo puntual para situaciones de sequía. Esta delimitación debería tener su representación cartográfica y sus garantías jurídicas para poder asegurar una adecuada gestión de esos espacios. La amplia presencia de terrenos comunales en la cuenca es una ventaja de partida para esta actuación.

Medidas de gestión: Es importante implicar a los agentes del territorio en la gestión de los EPH, empezando por los propios ayuntamientos, muy relacionados históricamente con la gestión de los comunales. La gestión adaptativa de esos espacios de prioridad hidrológica debe fundamentarse en la proximidad de la intervención, tejiendo una red de intereses compartidos con los agentes comprometidos que aseguren el adecuado mantenimiento de esos espacios con perspectiva temporal.

Medidas de concienciación: La encuesta realizada a agentes de la cuenca ha puesto en evidencia la debilidad del conocimiento existente sobre las complejas relaciones Agua-Suelo-Territorio. Es esencial socializar el conocimiento generado aprovechando todos los ámbitos de la comunicación y distinguiendo grupos objetivo (educación, sociedad, técnicos, decisores ...). La gestión adaptativa de los Espacios de Prioridad Hidrológica debería ser un ámbito de encuentro de agentes y, a partir de ahí, de socialización y de concienciación. Al fin y al cabo, el agua es un elemento estratégico de nuestra vida, de la vida del territorio y eje de la adaptación. Si somos capaces de entender eso y de actuar en consecuencia estaríamos más cerca de adaptarnos a los cambios globales en marcha, seríamos más resilientes.

7.4 Conclusiones

Centramos las conclusiones del capítulo en los Espacios de Prioridad Hidrológica (EPH), como espacios integrados de adaptación, aplicados a las zonas de captación de agua para el abastecimiento, actual o futuro. Consideramos estas zonas como referencia obligada ya que el suministro de agua es considerado por el Sistema de Contabilidad Ambiental-Económica (SEEA por sus siglas en inglés) de los Ecosistemas como un servicio ecosistémico fundamental (Portela et al., 2019) y esencial para la adaptación. Lo hacemos desde la gestión adaptativa hidrológica con visión territorial, sin entrar en el otro ámbito fundamental para las políticas del agua, que es la gestión social de la demanda.

La Figura 7.10 recoge los aspectos a considerar en esta medida estratégica de adaptación hidrológica. Con el objetivo de gestionar el territorio como un mosaico de usos, el primer paso es delimitar los Espacios de Prioridad Hidrológica a considerar en el territorio objeto de análisis (una cuenca fluvial, preferentemente). Esta delimitación debe tener en cuenta la naturaleza de la captación (aguas superficiales, aguas subterráneas), y, por tanto, del ámbito espacial de los procesos que condicionan la presencia del recurso en ese punto. Los espacios limitados deberían estar recogidos en las diferentes cartografías del planeamiento territorial, reflejando su “vocación” hidrológica. Obviamente, esto es una propuesta cuya concreción dependerá de las posibilidades reales en cada ámbito competencial, pero, en cualquier caso, hay que establecerla como apuesta en el camino de la adaptación, sobre todo desde la base municipal.

El segundo paso es elaborar un diagnóstico sobre las implicaciones hidrológicas que pudieran estar teniendo los usos del suelo actuales. Para ello es necesario considerar toda la información previa disponible: evolución temporal de los cambios en los usos o gestión del suelo, datos del recurso en el punto de captación (posibles tendencias en caudales, calidad ...). Probablemente, se pueda establecer una separación entre usos consolidados y no consolidados dentro del EPH delimitado.

Poner en valor los recursos hídricos de un territorio (cuenca), y asegurar su disponibilidad espacio-temporal, supone actuar directamente sobre el territorio (cubierta, usos y gestión del suelo), sobre todo en aquellos espacios en los que los procesos hidrológicos condicionan esa disponibilidad. Se trata de promover una gestión adaptativa del territorio con un enfoque hidro-ecosistémico, como estrategia clave para desarrollar medidas de adaptación al cambio climático.

Por uso consolidado entendemos la cubierta vegetal, del tipo que sea, que no ha sufrido cambios durante décadas y que, a priori al menos, podemos considerar que ha alcanzado una cierta eficiencia hídrica, en el sentido de aportar más agua (azul) que la que evapotranspira (verde). Esto favorecería tanto la disponibilidad como la estacionalidad del recurso. Ahora bien, estos aspectos habría que valorarlos con expertos en la materia (hidrología, geología, edafología, botánica, geografía ...), y teniendo en cuenta las condiciones biofísicas específicas de la cuenca. Para estos usos se trataría de establecer la gestión adecuada para el mantenimiento de la eficiencia hídrica.

Por uso no consolidado entendemos las cubiertas vegetales que con una cierta frecuencia están en situación de cambio, natural o planificado, y que, a priori, suponen una alteración importante de los procesos hidrológicos, al aumentar de forma notable su consumo de agua, lo que implica la consiguiente disminución de los caudales. De hecho, la literatura científica corrobora de forma clara que las mayores afecciones hidrológicas se dan en situaciones de cambios frecuentes de uso del suelo. En este sentido, resulta especialmente preocupante la existencia en el EPH de plantaciones forestales de crecimiento rápido y ciclo corto de talado (habituales en ámbitos pirenaicos), ya que al alto consumo de agua por parte de los árboles jóvenes se une la pérdida de suelo (y consiguiente arrastre de sedimentos), a veces muy importante, por la inadecuada gestión forestal.

En la necesaria transición hacia cubiertas y usos de la cuenca que garanticen la eficiencia hídrica de la vegetación y la regulación hidrológica del

suelo es fundamental repensar la silvicultura (hidrología forestal) y dirigirla hacia un marco conceptual como sistema adaptativo complejo: especies adecuadas en los lugares adecuados y adecuadamente gestionados.

Estos pasos deben de venir acompañados por una serie de aspectos complementarios que sólo enumeramos, ya que su profundización y concreción es inherente a la cuenca concreta objeto de estudio (territorialización de las decisiones). Uno es el régimen de propiedad de los terrenos en el Espacio de Prioridad Hidrológica; obviamente, facilita la gestión adaptativa el hecho de que sean, o puedan llegar a ser, terrenos públicos, o comunales, si bien eso no quita que los privados estén sometidos a una planificación que claramente priorice la funcionalidad hidrológica. Lo público tiene mucho que decir y hacer, siempre desde la claridad de los objetivos y de los medios para su consecución. Las medidas de pagos por servicios ecosistémicos (Tognetti et al., 2004) pueden ofrecer un marco adecuado para garantizar los objetivos.

Otro aspecto a considerar es la gestión interna del EPH; en este sentido, y dependiendo de la escala del Espacio de Prioridad Hidrológica, puede considerarse su zonación en términos de diferentes niveles de perímetros de protección, de manera que las limitaciones al uso o gestión del suelo puedan ser más o menos restrictivas según distancia al punto de captación o a la red de drenaje. Esto nos lleva a considerar otro elemento clave, que es el del conocimiento de los procesos implicados en la funcionalidad hidrológica del territorio. De hecho, un problema importante para hacer frente al cambio climático desde la adaptación hidrológica es el escaso conocimiento que, usualmente, tenemos al respecto.

Por eso, el seguimiento espacio-temporal de procesos (monitoring), en el marco de las relaciones suelo-agua-vegetación es esencial y debe ser tomado como medida imprescindible en la estrategia de adaptación. Este seguimiento es, además, imprescindible para verificar la bondad de las salidas de los modelos eco-hidrológicos, que si bien son de todo punto necesarios deben ser de forma continuada alimentados por series de datos que representen la cuenca real.

diagnóstico certero y en las previsiones complejas, y, en consecuencia, informen la toma de decisiones.

Por último, la adaptación es, ante todo, un proceso social, colectivo, desde y para la gente, desde y para los territorios del Pirineo. Hay mucha sabiduría popular no actualizada, hay mucha memoria histórica a recuperar sobre las implicaciones de los cambios en el territorio, y toda es necesaria para ayudar a entender el presente. Además, para avanzar hacia la resiliencia hidrológica del territorio, y de sus gentes, es necesario implicar a muchas personas del diverso conocimiento académico, que integrando saberes parciales ayuden en el

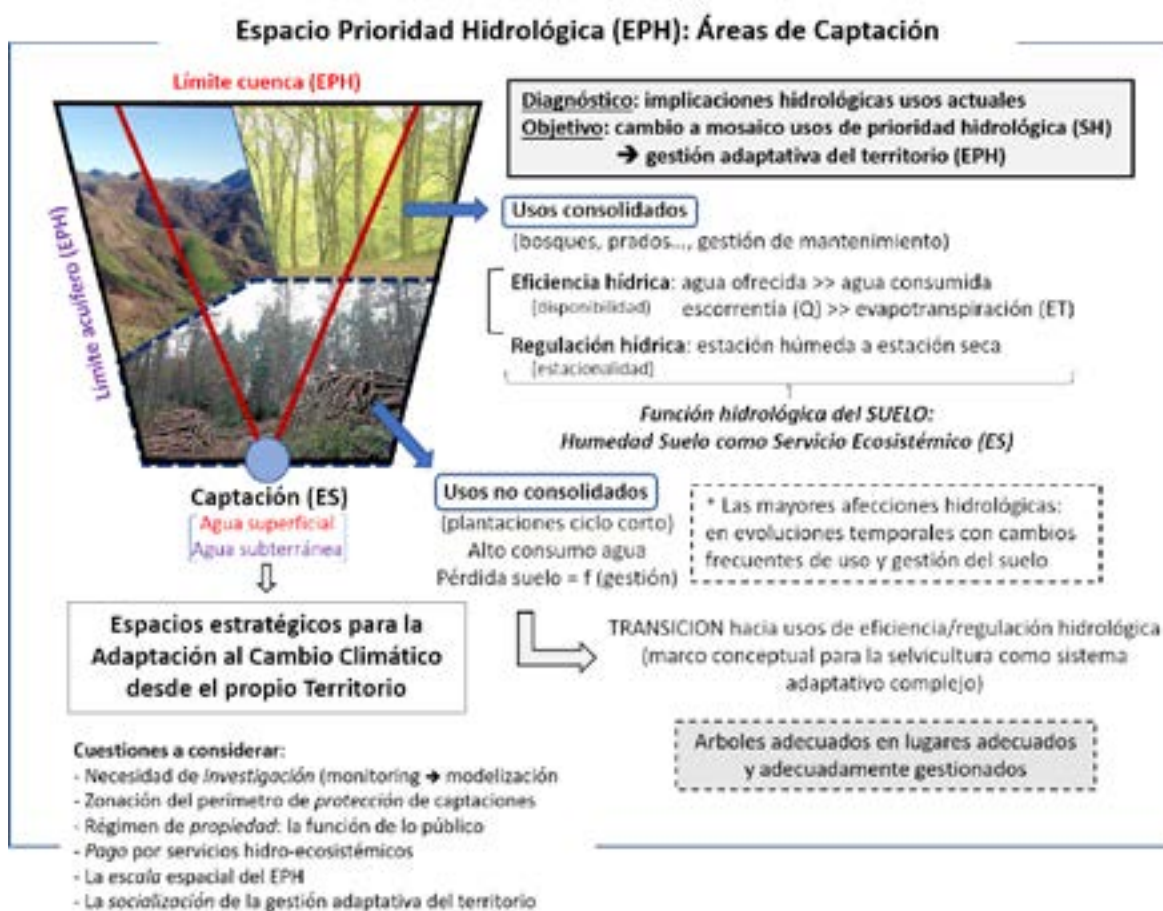


Figura 7.10. Hoja de ruta para el desarrollo de los Espacios de Prioridad Hidrológica (EPH).

(Fuente: elaboración propia.)

8. Transformación del territorio y dinámica hidrológica en cabecera: el caso de la turbera de Bernadouze en el Ariège

**Roxelane Cakir, Gaël Le Roux,
José Miguel Sánchez Pérez (CNRS)**

Los recursos hídricos del territorio POCTEFA proceden principalmente de las zonas montañosas y fluyen hacia la cuenca hidrográfica según una dinámica estacional. Las montañas se consideran torres de agua gracias a la nieve y los glaciares que se encuentran en ellas. La reserva de nieve estacional está disminuyendo claramente debido al cambio climático. La evolución del stock de nieve tiene un impacto no sólo en el agua azul sino también en el agua verde. En los últimos cincuenta años se han observado cambios en el territorio pirenaico, en particular en la cuenca del río Vicdessos, en el Ariège. La gestión forestal y los cambios en los usos del suelo pueden tener un efecto en el funcionamiento hidrológico de la cuenca y en las exportaciones de carbono de los ríos. A partir de las observaciones de la turbera de Bernadouze durante los últimos diez años y de un enfoque de modelización, se elaboran resultados y perspectivas que pueden servir para mejorar la co-gestión de los entornos de montaña, es decir, los bosques y los humedales, de acuerdo con los imperativos económicos y climáticos. Se probaron escenarios con y sin gestión forestal para comprender el impacto de la silvicultura en los componentes hidrológicos. Las tendencias muestran que la capa de nieve invernal será más corta y que el deshielo podrá ser más temprano, lo que dará lugar a una suavización de la variabilidad hidrológica estacional. Si este cambio en la hidrología no se combina con un uso sensato de la tierra y los bosques, la erosión del suelo podría agravarse.

*Citar como: Cakir, R., Le Roux, G., Sánchez Pérez, J.M., 2023. Transformación del territorio y dinámica hidrológica en cabecera: el caso de la turbera de Bernadouze en el Ariège. En (Beguería, S., ed.), Adaptación al cambio climático en la gestión de los recursos hídricos de los Pirineos. Memorias científicas del proyecto PIRAGUA, vol. 2. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Zaragoza, España, 153-166.
<https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14684>*

8.1 Introducción

El Alto Vicdessos se localiza en la cabecera de la cuenca del río Vicdessos, afluente del Ariège en Tarascon sur Ariège (Figura 8.1). El Alto Vicdessos ha sido objeto de estudios científicos por parte de la Universidad de Toulouse y el Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) durante muchos años. Este marco se formalizó con la creación del Observatoire Hommes et Milieu (OHM) Haut-Vicdessos, hace unos diez años, y el apoyo de la Agence Nationale de la Recherche a través de un proyecto llamado DRIIHM que coordina todos los OHM en el territorio francés e internacionales.

Desde la Antigüedad el Alto Vicdessos fue una importante zona minera conocida por sus minas de hierro y plata y, más recientemente, por su industria del aluminio (Pechiney). La zona de cabecera y luego los valles están marcados por el cese de las actividades mineras y el declive de la actividad pastoral durante el siglo XX, y el cese de la industria del aluminio a finales del siglo. La actividad de producción de aluminio en Auzat, alimentada por energía hidroeléctrica, duró 100 años, desde 1908 hasta 2003. Estos abandonos de actividad están marcados por una reestructuración de las actividades económicas en torno al turismo, así como por una importante modificación del paisaje (Davasse et al., 2012).

El territorio del Alto Vicdessos se caracteriza por la presencia de numerosas turberas, como por ejemplo la turbera de Bernadouze o las de los Etangs de Bassiès. En este contexto, el Laboratorio de Ecología Funcional y Medio Ambiente (OMP) de la Universidad de Toulouse y el CNRS, en el marco de la OHM Haut Vicdessos y del Servicio Nacional de Vigilancia de Turberas, realiza un seguimiento de la evolución hidro-biogeoquímica de la turbera de Bernadouze, situada cerca del puerto de Lers. Estos estudios se llevan a cabo en estrecha colaboración con los laboratorios GEODE y CESBIO de Toulouse e ISTO de Orleans. La turbera de Bernadouze en el Alto Vicdessos, en el valle de Suc y Sentenac, tiene una posición privilegiada al situarse cerca del Col de Lers, un vínculo con otra región histórica del Ariège: los Couserans.

El Col de Lers es un importante lugar turístico: esquí de fondo, Tour de Francia, excursiones

familiares o deportivas, pesca, etcétera. También es un lugar frecuentado por niños y adolescentes que se alojan en Suc y Sentenac para realizar estancias educativas en la naturaleza.

El observatorio de montaña de la turbera de Bernadouze, en la cabecera de la cuenca de un pequeño arroyo del Ariège, tiene como objetivo estudiar el papel de la evolución del paisaje (turbera y bosque) en relación con el cambio global, incluido el cambio climático.

La turbera de Bernadouze forma parte del sitio Natura 2000 “FR7300825 - Mont Ceint, mont Béas, tourbière de Bernadouze” y está gestionada por la Oficina Nacional de Bosques.

Efectivamente, hay un bosque que rodea el lugar y que ha sido objeto de una tala forestal concertada con científicos en la que se cortó un

árbol de cada tres en septiembre de 2016 (Figura 8.2).

Por último las turberas y, más en general, los suelos, han sido identificados como zonas de amortiguación esenciales para retener los micro-contaminantes metálicos, como el plomo, procedentes de la historia metalúrgica del valle (Hansson et al., 2017 y 2019). En la turbera de Bernadouze, un estudio paleo-ecológico reveló una removilización de metales pesados como el plomo durante los cambios en el paisaje desde el siglo XVI hasta el XIX. La materia orgánica del suelo y de la turba, al ser una trampa natural que retiene los contaminantes, es objeto de un doble seguimiento centrado tanto en el ciclo del carbono como de los metales.



Figura 8.1. Localización de la zona de estudio y principales paisajes.

(Fuente: elaboración propia.)



Figura 8.2. Tala forestal en el entorno de la turbera de Bernadouze en 2016.

(Fotografías: T. Rosset.)

8.2 Caso de estudio

8.2.1 Simulación del funcionamiento hidrológico de la cuenca de Bernadouze

Se implementó un modelo hidrológico mediante la herramienta Soil and Water Assessment Tool (SWAT), con el objetivo de simular el balance hidrológico de la cuenca de Bernadouze.

Le bassin a une superficie de 23.194 ha. La Figura 8.3 muestra un esquema del dominio espacial incluido en el modelo.

El arroyo es un afluente del río Vicdessos. Banque Hydro controla el caudal en los aforos de Artigues y Vicdessos, y los laboratorios de la OMP controlan la estación de aforos de Bernadouze. La cuenca cuenta con varias obras hidráulicas pertenecientes a Électricité De France, EDF (Figura 8.4).

Las proyecciones futuras se realizaron a partir de un conjunto de datos climáticos elaborados por el proyecto CLIMPY (Box 8.1). Teniendo en cuenta el tiempo y los recursos computacionales necesarios para realizar los diferentes proyectos hidrológicos con cada modelo climático y escenario, se utilizó una selección de seis modelos bajo dos escenarios de emisiones, RCP 4.5 y RCP 8.5. Los modelos seleccionados se presentan en la Tabla 8.1.

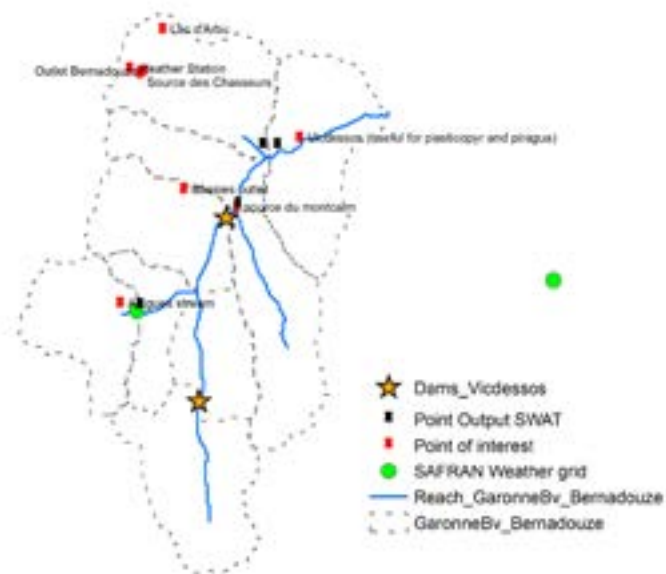


Figura 8.3. Principales elementos de la modelización hidrológica de la turbera de Bernadouze, en el Alto Vicdessos.
(Fuente: elaboración propia.)



Figura 8.4: Sistema hidroeléctrico de Auzat.
(Fuente: EDF, 2019).

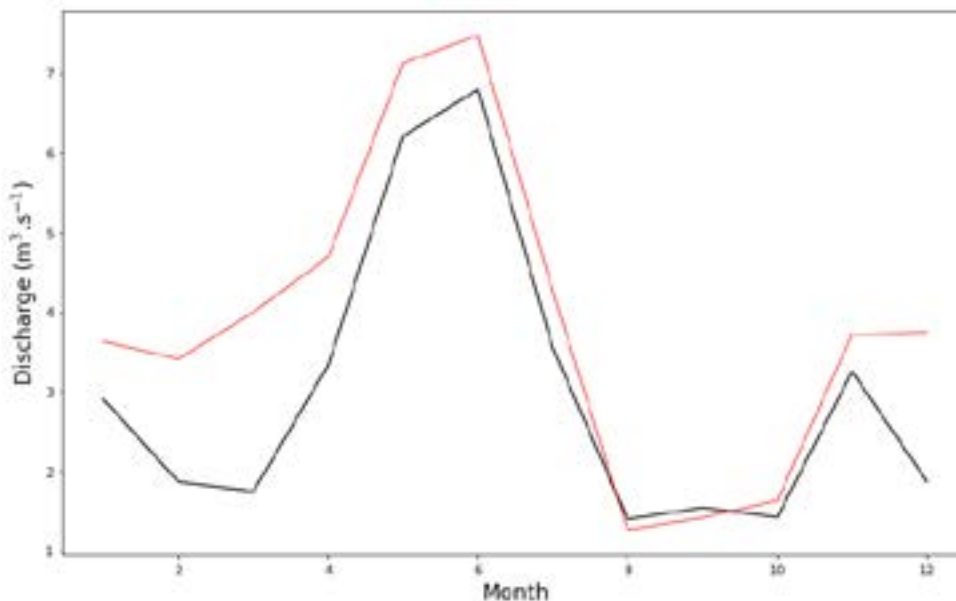
Tabla 8.1. Modelos de proyecciones climáticas utilizados en el caso de estudio.

Modelo	Institución	Referencia
bcc.csm1.1	Beijing Climate center (China)	Xiao-Ge et al., 2013a y 2013b.
CNRM.CM5	National center for meteorological research (France)	Voldoire et al., 2013.
inmcm4	Institute of Numerical Mathematics (Russia)	Volodin et al., 2013.
MIROC.ESM	Agency for Marine-Earth Science and Technology (Japan)	Watanabe et al., 2011.
MPI.ESM.MR	Max Plack Institut (Germany)	Giorgetta et al., 2013.
MRI.CGCM3	Meteorological research institute (Japan)	Yukimoto et al., 2012.

La calibración y la validación de la modelización hidrológica se llevaron a cabo en pasos de tiempo mensuales para el período 1980-2013. La calibración se llevó a cabo desde 1985 hasta 2005, inicialmente de forma manual y utilizando la experiencia de algunos estudios previos (Grusson, 2016; Cakir, 2020). La calibración inicial fue seguida por un paso de calibración estadística utilizando la herramienta SWAT-CUP, utilizándose el algoritmo SUFI-2 y un total de 1500 iteraciones. A continuación, se llevó a cabo la validación durante el período comprendido entre 2006 y 2013. La particular hidrología del clima de montaña nos llevó a establecer bandas de elevación para calibrar el deshielo (ver Grusson et al., 2015). La presencia de presas

perturba toda la parte inferior de la cuenca del Vicdessos. A continuación, se instalaron presas en el Pla de Soucelm y en la central de Auzat.

Para aplicar los escenarios de cambio climático se simuló la evapotranspiración potencial con el método de Hargreaves, y se calibró el funcionamiento de las presas con la capacidad de las mismas y con aproximaciones de los desembalses máximos y mínimos mensuales. La Figura 8.5 muestra los caudales medios mensuales interanuales durante el período 1980-2013 en la salida de la presa de Pla de Soucelm. La Tabla 8.2 muestra la comparación de los flujos observados y simulados y su diferencia absoluta, ofreciendo resultados satisfactorios.



(Fuente: realización propia.)

Box 8.1. Base de datos climáticos y proyecciones futuras.

El proyecto Interreg Poctefa CLIMPY (“Caracterización del cambio climático y suministro de información para la adaptación en los Pirineos”) elaboró un conjunto de datos climáticos específicamente adaptado a la región pirenaica. El conjunto de datos que ofrece CLIMPY es bastante amplio y se basa en algoritmos dinámicos y estadísticos, así como en la generación de análisis de referencia de la temperatura y la precipitación diarias con una alta resolución horizontal (malla de 5 km) y vertical (reanálisis SAFRAN para franjas altitudinales de 300 m). CLIMPY incluye proyecciones de un conjunto de modelos climáticos globales CMIP5 (19 modelos) y combinaciones con modelos climáticos regionales Euro-Cordex (13 combinaciones GCM/RCM), considerando cuatro escenarios de emisiones (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5).

Tabla 8.2. Comparación entre los valores observados y simulados medios de caudal medio mensual a la salida del embalse de barrage du Pla de Soulcem, entre 1980 y 2013 (m³/s).

Mes	Caudal simulado	Caudal observado	Diferencia
1	3.1	2.9	-0.22
2	2.4	1.9	-0.57
3	2.8	1.7	-1.03
4	3.8	3.3	-0.49
5	6.1	6.2	0.13
6	7.2	6.8	-0.37
7	5.1	3.5	-1.55
8	2.4	1.4	-1.01
9	1.5	1.5	-0.02
10	1.6	1.4	-0.17
11	2.8	3.2	0.48
12	2.6	1.9	-0.77

8.2.2 Impactos del cambio climático en la hidrología

En los últimos cincuenta años se ha producido una importante disminución del manto de nieve y del caudal medio anual en los Pirineos (López-Moreno et al., 2008; Lorenzo-Lacruz et al., 2012). Teniendo en cuenta los efectos del cambio climático (IPCC, 2014), las predicciones apuntan a un aumento general de las precipitaciones a lo largo de todo el año y, en particular, un aumento de la variabilidad de los eventos, especialmente a través de un aumento de los extremos. ¿Cuáles son los posibles efectos combinados del cambio

de paisaje y del cambio climático (cobertura de nieve)? La Figura 8.6 muestra el régimen mensual de las principales variables del balance hídrico (precipitación, caudal, reserva de nieve, fusión de nieve, generación de caudal, infiltración y evapotranspiración) en Artigue, para cada periodo y cada escenario de emisiones en comparación con el periodo de referencia 1985-2013.

Los resultados apuntan a una mayor pluviosidad en Artigues durante el periodo estival (Figura 8.6A). El aumento de la temperatura induce directamente cambios hidrológicos que influyen en la evapotranspiración, pero también en la formación y el deshielo de la nieve. El aumento

del caudal es especialmente marcado en el periodo de septiembre a mayo (Figura 8.6B). Hay un efecto notable de aumento de la escorrentía que contribuye al aumento del caudal (Figura 8.6C).

Aunque las simulaciones hidrológicas asociadas a los modelos de cambio climático no muestran necesariamente un cambio futuro en el volumen de agua anual, la estacionalidad del flujo de agua cambiará a medida que disminuya la capa de nieve en invierno.

Esto se debe a una mayor cantidad de precipitaciones líquidas en invierno a mayor altura, junto a una menor acumulación de nieve (Figura 8.6D) y a episodios de deshielo más rápidos y tempranos, así como a un aumento significativo de las temperaturas en verano. El balance hídrico se ve globalmente afectado con una inversión de las curvas entre los periodos de referencia y los proyectados entre las estaciones de verano e invierno (Figura 8.6E). También hay cambios en la infiltración de agua en los acuíferos, con un aumento a lo largo del año, excepto en el periodo de mayo a julio. Además, hay un cambio general en los procesos hidrológicos, con máximos de caudal que se producen más temprano en el año y periodos de estiaje más severos. Del mismo modo, la Figura 8.6B muestra que la duración de los caudales máximos de otoño es mayor en los plazos de 2050 y 2100 en Artigues.

La capa de nieve durará menos tiempo y será menos importante. ¿Cuál es el impacto en la hidrología de las cuencas de cabecera en un contexto de cambio de paisaje?

La Figura 8.7 muestra los caudales medios específicos estacionales en Artigue y Vicdessos en función del periodo de referencia y en comparación con los dos escenarios de emisiones RCP 4.5 y RCP 8.5. En Artigues se observa una disminución significativa de los caudales de verano a partir de 2050, y en primavera para 2100. Por el contrario, el caudal aumenta significativamente en invierno y otoño para el año 2100. El caudal específico en Vicdessos se ve afectado por la presa situada aguas arriba. El aumento del caudal durante las estaciones

de otoño e invierno se atenúa al almacenarse más agua en las presas. Sin embargo, como los periodos de estiaje son más frecuentes y severos, la presencia de la presa con la gestión actual no será suficiente para mitigar la falta de agua en primavera y verano.

La variación de los caudales en 2050 es significativa si se observa la variación estacional, pero es no significativa si se observa la variación anual, con aumentos de caudal de septiembre a mayo que compensan los descensos del verano (Figura 8.6B). En 2100, las variaciones de caudal parecen ser más marcadas, pero también van acompañadas de una mayor incertidumbre. En cuanto a los diferentes componentes del balance hidrológico, los resultados muestran un fuerte impacto en el contenido de agua del suelo y un aumento sustancial de la evapotranspiración en invierno. En verano, sin embargo, los flujos de evapotranspiración son menores (Figura 8.6G) debido a la falta de contenido de agua en el suelo para satisfacer la demanda de evaporación, lo que pone de manifiesto posibles déficits futuros de reservas de agua útiles para el desarrollo de las plantas. El caudal superficial disminuye significativamente en verano, mientras que en invierno el caudal aumenta debido a la disminución del manto de nieve combinada con el aumento de las precipitaciones líquidas, lo que favorece la generación de escorrentía superficial.

8.2.3 Estrategias de adaptación: impacto de la tala forestal sobre los cambios del paisaje

La explotación de la madera es una actividad económica importante para muchas comunidades de los Pirineos, y es probable que esta explotación aumente con el uso de la biomasa como fuente de energía y la utilización de la madera como material. El CNRS, en consulta con la ONF, pudo estudiar el impacto una tala controlada en los bosques circundantes a la turbera de Bernadouze. Además del impacto potencial para la biodiversidad, se planteó la cuestión del impacto de la tala en los ciclos biogeoquímicos, en particular en la exportación de materia

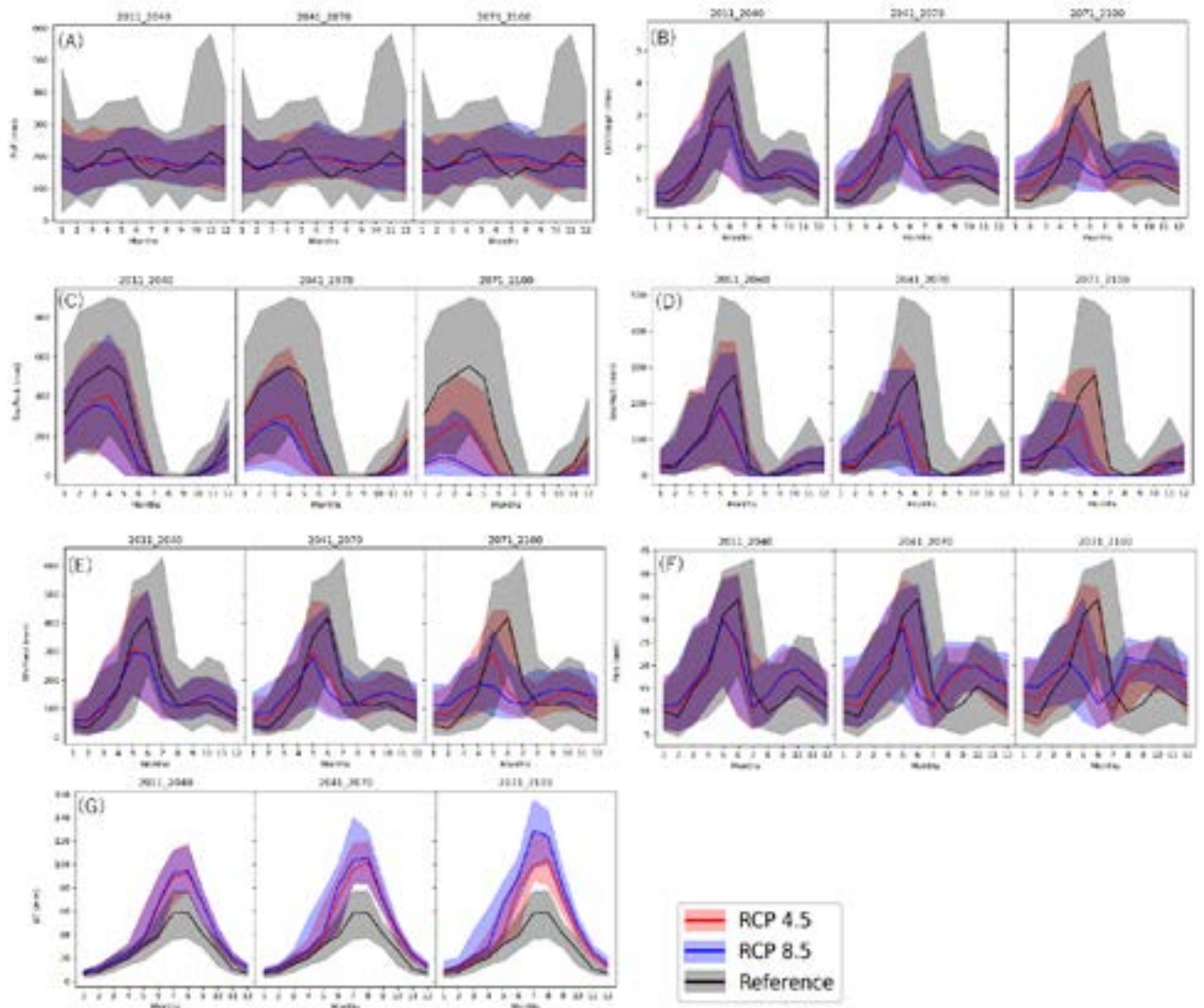


Figura 8.6. Promedio mensual de precipitación (PcP), descarga (Discharge), manto de nieve (SnoPack), deshielo (SnoMelt), rendimiento hídrico (WtrYield), infiltración (Perc) y evapotranspiración (ET) en Artigue, para cada período de tiempo y escenario de emisiones en comparación con el período de referencia 1985-2013. Las envolventes sombreadas indican la variabilidad del conjunto de modelos climáticos utilizados; las líneas azules indican las medianas para el escenario RCP 8.5, las líneas rojas indican las medianas para el escenario RCP 4.5 y las líneas negras representan el período de referencia. La unidad es el milímetro.

(Fuente: elaboración propia.)

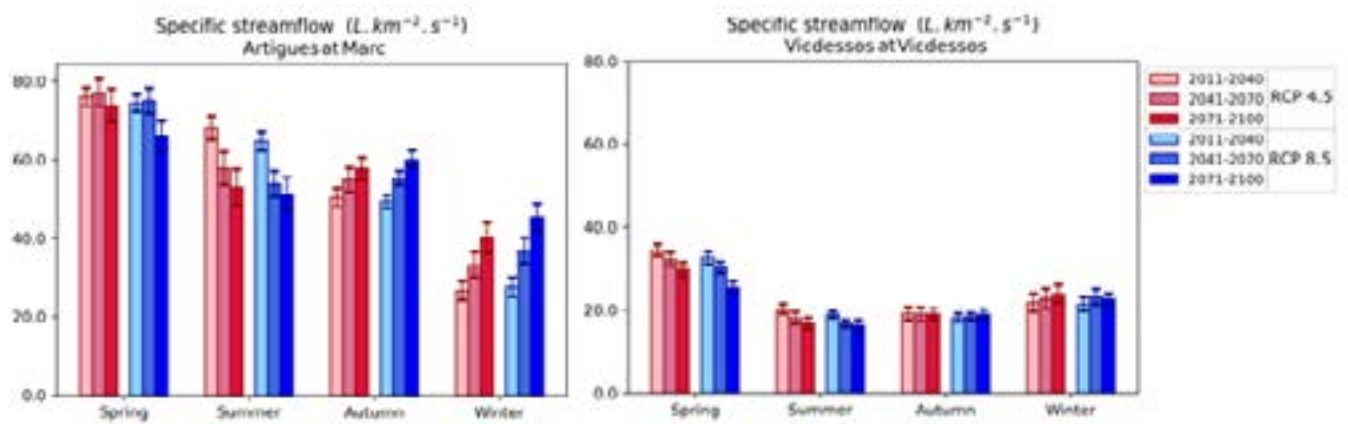


Figura 8.7. Caudal específico estacional medio en Artigues y Videssos para diferentes horizontes temporales y escenarios de emisión. Las barras rojas representan el escenario RCP 4.5 y las azules el escenario RCP 8.5. Primavera corresponde a los meses de Abril a Junio, verano de Julio a Septiembre, otoño de Octubre a Diciembre, e invierno de Enero a Marzo.

(Fuente: elaboración propia.)

orgánica de la turbera de Bernadouze, situada muy próxima a la zona de tala (Figura 8.8).

La evolución del paisaje es un factor clave en la hidrología de las cabeceras de montaña. No sólo puede modificarse la hidrología, sino que la erosión por tala es importante y, según nuestras simulaciones, aumentará con el cambio climático.

Este estudio de caso ilustra las relaciones entre el cambio del paisaje y el cambio climático en las montañas, donde la montaña es a la vez un centinela del cambio climático, pero también puede verse como un recurso en respuesta a las estrategias de adaptación al cambio climático.

La simulación de situaciones extremas de gestión del paisaje (tala de bosques, o recuperación del bosque tras el abandono del pastoreo) arroja luz sobre las complejas relaciones entre los ecosistemas sensibles de bosques y turberas y el cambio climático.

El diagrama de la Figura 8.9 ilustra la relación entre la tala de bosques y el funcionamiento de la cuenca hidrográfica, en particular en lo referente a la exportación de carbono orgánico aguas debajo de la turbera (Rosset, 2019). Aunque la tala de bosques es reciente, los primeros

controles hidro-geoquímicos no han mostrado ninguna alteración significativa del medio. La tala controlada (un árbol de cada tres) ha limitado probablemente los impactos en un entorno de fuerte pendiente en el que una tala desnuda habría tenido un fuerte impacto.

A la vista de este esquema, del proceso actual de reconquista por matorrales o incluso coníferas en el Alto Vicdessos, y de la literatura científica, la reforestación de las zonas de pastoreo es un escenario a considerar. De hecho, estudios anteriores (Simonneau et al., 2013; MacDonald et al., 2000; Marquer et al., 2020) subrayan la importancia de la reforestación de la cuenca del Vicdessos en las últimas décadas, especialmente de las zonas de pastoreo. Además, los estudios destacan el impacto de la tala de bosques en los procesos hidrológicos (Binet et al., 2020).

Para analizar el impacto de los escenarios de gestión de los entornos naturales, incluidos los bosques, sobre los recursos hídricos, teniendo en cuenta además el cambio climático, se evaluaron tres escenarios hipotéticos de gestión forestal:

- Escenario S0: sin cambios;
- Escenario S1: expansión forestal natural en las zonas de pastoreo (18% de la superficie de la cuenca);

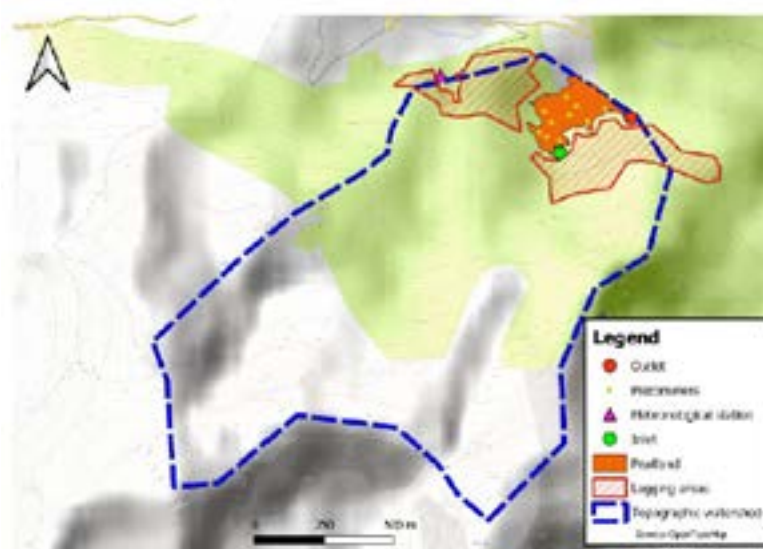


Figura 8.8. Localización de la tala forestal controlada en la cuenca vertiente de la turbera de Bernadouze en el año 2016.

(Fuente: elaboración propia.)

- Escenario S2: tala completa del 30% de la superficie forestal (16,3 km²);
- Escenario S3: expansión forestal natural en las zonas de pastoreo y tala del 30% de la superficie forestal total.

Los resultados de la simulación hidrológica muestran que los cambios en los usos del suelo y la vegetación podrían tener un impacto significativo en los procesos fluviales. La Figura 8.10 muestra la evolución de las variables de caudal, escorrentía y exportación de sedimento aguas debajo de la turbera de Bernadouze bajo la gestión actual (S0) y tres escenarios de

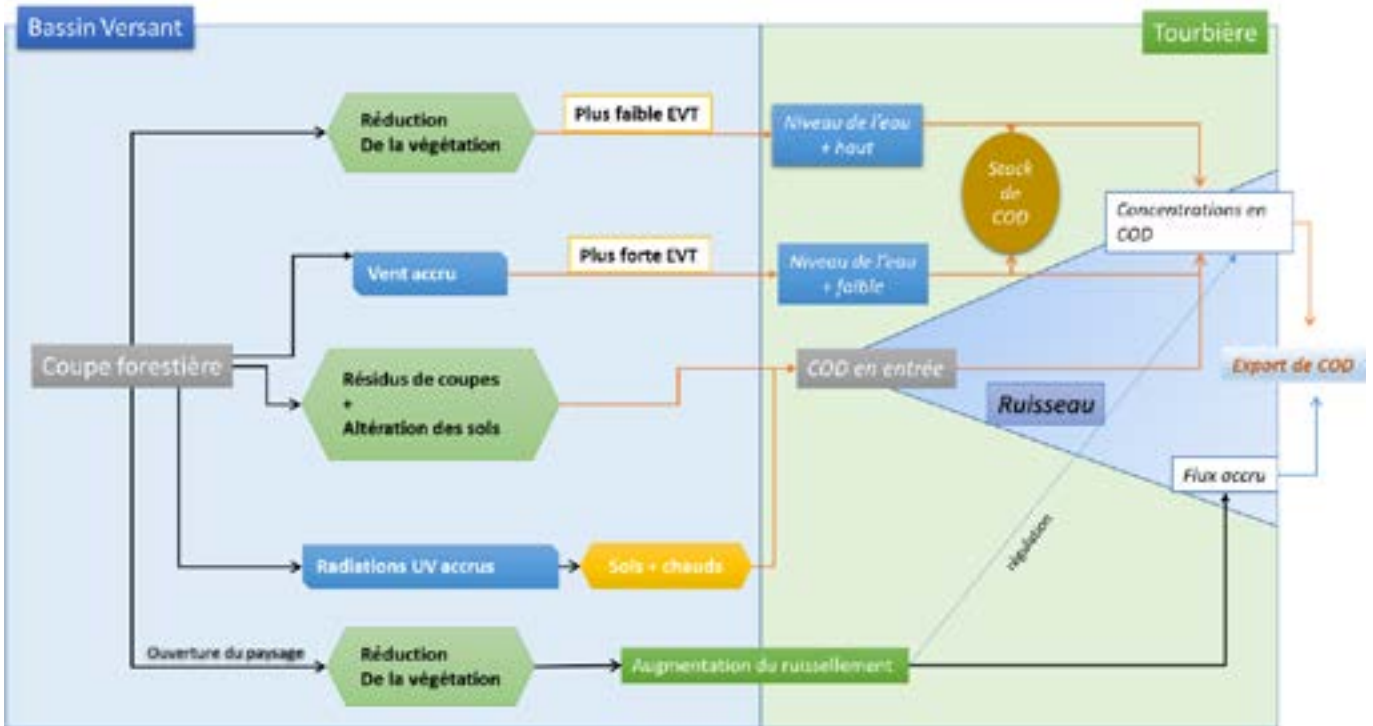


Figura 8.9. Esquema de las relaciones entre distintas variables hidro-geoquímicas potencialmente afectadas por una tala forestal en el entorno de una turbera. EVT: évapotranspiration; COD: carbone orgánico disuelto.

(Fuente: a partir de Rosset, 2019.)

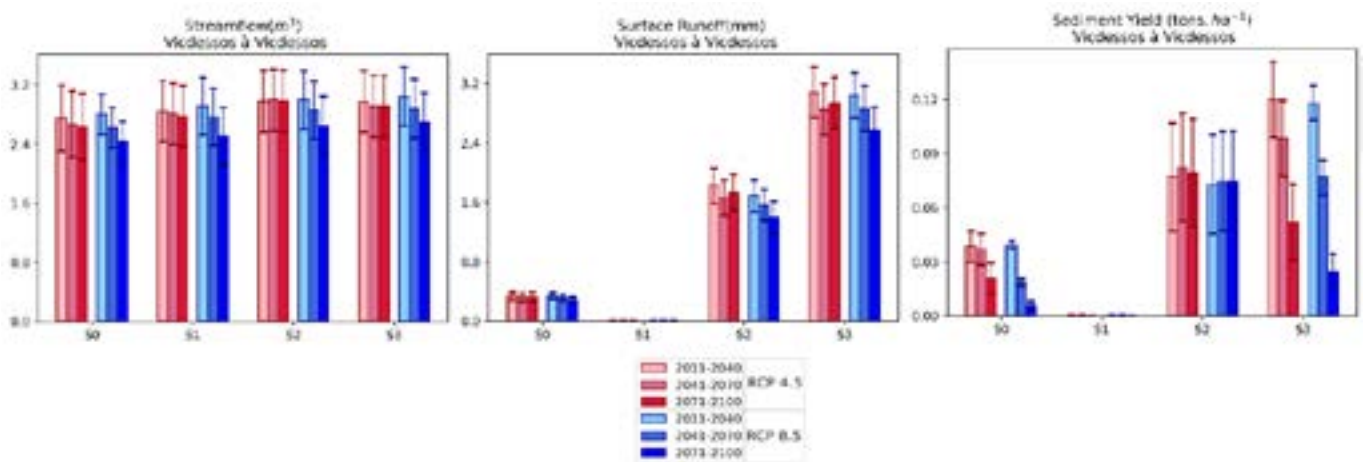


Figura 8.10. Caudal medio anual (m³ s⁻¹), escorrentía superficial (mm) y aporte de sedimento (Mg ha⁻¹) en Vicedessos para cada periodo y escenario de emisiones, bajo cuatro escenarios de gestión (ver detalles de los escenarios S0 a S3 en texto principal).

(Fuente: elaboración propia.)

Box 8.2. Desarrollo de estrategias de adaptación para el Alto Vicdessos.

Los Pirineos centrales, incluido el territorio del Alto Vicdessos, se caracterizan por un mosaico evolutivo de paisajes.

- Es necesario considerar un enfoque integrado que combine la gestión concertada de los paisajes y los recursos hídricos para gestionar mejor los recursos hídricos en el futuro.
- Los ecosistemas forestales son zonas de amortiguación que regulan el ciclo del agua y la materia (sedimento y contaminantes).
- La reducción de la capa de nieve o incluso su desaparición a ciertas altitudes tendrá un impacto en la estacionalidad de los flujos de agua y sedimento.
- Los futuros cambios drásticos en los paisajes de montaña por la exacerbación de la silvicultura asociada al cambio climático pueden contribuir a un cambio significativo en el ciclo hidrológico y en los flujos de sedimento asociados a una mayor erosión en las laderas.
- Para establecer una gestión sostenible de los recursos hídricos frente al cambio climático en las montañas es necesario implicar a los gestores de los ecosistemas de montaña sensibles, como las turberas o los bosques.
- Para ello, es necesario conocer bien los volúmenes de los suelos forestales y las zonas de turba.

desarrollo (S1 a S3). Los estudios preliminares en Bernadouze han mostrado que el impacto de la tala gestionada en 2016 fue limitado (Rosset, 2019). Sin embargo, la tala tiene un impacto en las turberas (Binet et al., 2020) y podría influir en el caudal de los arroyos. Un enfoque de modelización de la explotación forestal en el marco temporal de 2050 y 2100 muestra una influencia significativa en la escorrentía, la erosión y el caudal. La tala del 30% del bosque bosques provoca un aumento no significativo del caudal y un incremento de la erosión (+4,7 kg/ha/mes en el horizonte 2050, y +6,7 kg/ha/mes en el horizonte 2100) y de la escorrentía (+0,3 Hm³/mes en los horizontes 2050 y 2100). Por el contrario, la expansión forestal en las zonas de pastos conduce a una disminución de la erosión y la escorrentía de -1,2 toneladas/ha/mes y -0,1 Hm³/mes, respectivamente, en los horizontes 2050 y 2100. Las principales recomendaciones para el desarrollo de una estrategia de adaptación que se desprenden del estudio de caso se presentan en el Box 8.2.

8.3 Conclusiones

En el caso de estudio de la cuenca del Alto Vicdessos se ha demostrado que la gestión del paisaje influye sobremanera en el ciclo del agua en los horizontes 2050 y 2100. Un estudio local en torno al sitio instrumentado de la turbera de Bernadouze demostró el impacto limitado de una corta forestal razonada.

El seguimiento hidro-geoquímico de la turbera de Bernadouze (OHM Haut-Vicdessos, Service National d'Observation des Tourbières) en el marco del proyecto ha permitido monitorizar un gran número de variables hidro-ecológicas durante varios años. Este seguimiento es esencial para comprender las complejas relaciones entre el cambio climático y el cambio del paisaje. También nos permite validar los enfoques de modelización antes de ampliar nuestras simulaciones hidrológicas a toda una cuenca hidrográfica o incluso al conjunto de los Pirineos.

Nuestro estudio muestra el interés de realizar un seguimiento de una cuenca hidrográfica durante varios años para comprender las complejas relaciones entre la hidrología, los servicios ecosistémicos y los usos del suelo en territorios de montaña.

Las conclusiones observadas para la cuenca del Alto Vicdessos podrían extenderse a toda la zona pirenaica con las mismas características hidrológicas y las mismas estimaciones de la variabilidad del ciclo del agua en los horizontes temporales de 2050 y 2100. El fenómeno de la repoblación forestal es similar en muchos valles pirenaicos y la demanda de energía verde y madera aumentará la presión sobre los recursos forestales.

Un paso importante e indispensable para comprender la influencia del uso del suelo en las turberas y el ciclo hidrológico es la creación de un inventario en 3D de las turberas pirenaicas.

La segunda constatación es que actualmente se subestima la superficie de las turberas en los Pirineos, que no tiene en cuenta la estructura de las turberas. La capa de información de usos del suelo Corine Land Cover 2018 estima que 275 ha del macizo pirenaico están ocupadas por humedales, lo cual es una subestimación. Tampoco tiene en cuenta el factor tridimensional (el espesor de la capa de turba), que es esencial para el ciclo del agua de una turbera. La turbera de Bernadouze, por ejemplo, tiene más de ocho metros de profundidad. Estas subestimaciones pueden influir en los escenarios de adaptación.

De hecho, podría haber una desaparición accidental de las turberas debido a la antropización y a los cambios globales (sequía, incendios) si el inventario no se ha realizado correctamente, lo que podría influir en el ciclo hidrológico y sedimentario de la cuenca asociada. Del mismo modo, este inventario podría utilizarse para iniciar debates con las partes interesadas con el fin de desarrollar planes de gestión para prevenir cambios globales (Figura 8.11).

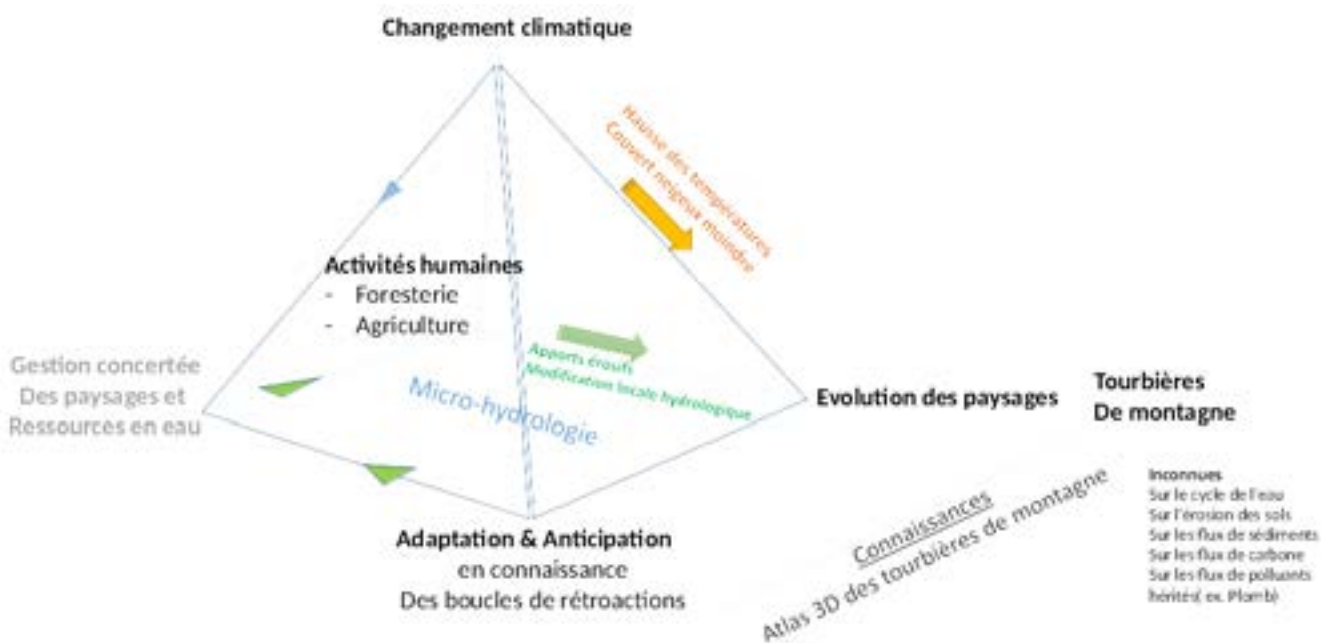


Figura 8.11. Micro-hidrología de las cuencas hidrográficas de montaña: ilustración de las incógnitas que es necesario caracterizar para lograr una mejor gestión concertada de los paisajes y los recursos hídricos.

(Fuente: elaboración propia.)

9. Impactos de las inundaciones y eventos extremos en los recursos hídricos de los Pirineos en un contexto de cambio climático

**Montserrat Llasat-Botija (UB), María del Carmen Llasat (UB),
Erika Pardo (UB), Pere Quintana-Seguí (OE)**

Este caso de estudio aborda las medidas de adaptación frente al riesgo de inundación y al impacto del cambio climático sobre el mismo. En primer lugar se presentan los diferentes tipos de medidas de adaptación y se concreta sobre aquellas ya existentes en distintos lugares de los Pirineos, presentándose una síntesis exhaustiva del estado del arte en el macizo. Con el objetivo de mejorar la adaptación gracias a una mejor coordinación y conocimiento de aquello que ya existe, la primera propuesta se centra en el mapeo de las medidas ya existentes para ayudar a los territorios de los Pirineos en la toma de decisiones sobre futuras medidas a implementar.

A continuación, se presenta la primera cartografía de episodios de inundaciones a escala municipal que se ha realizado hasta ahora para el conjunto de toda la región pirenaica, cubriendo el período 1981-2015.

Su utilidad se halla en dar a conocer un fenómeno que es mucho más frecuente y dañino de lo que se cree. Hay que tener en cuenta que además de los daños que las inundaciones pueden generar también afectan al suministro, la calidad del agua, y sus diferentes usos. Esta cartografía y base de datos asociada se considera también como una medida de adaptación que ayudará en la identificación de las zonas más afectadas por inundaciones, la recuperación de la memoria histórica y la sensibilización.

En esta línea se ha desarrollado la tercera propuesta que consiste en una aplicación de móvil, en todas las lenguas de los Pirineos y en inglés, con el objetivo de hacer a la ciudadanía participe de su propio proceso de empoderamiento frente a los extremos y el cambio climático, y recopilar información útil para la mejora de su conocimiento. Las tres propuestas se hallan dentro de las llamadas medidas de adaptación sociales y constituyen herramientas útiles para el desarrollo de procesos participativos que permitan encontrar soluciones ajustadas a las especificidades locales, así como la ayuda a los sistemas de toma de decisión frente a inundaciones a escala supramunicipal y suprarregional. En último lugar se ha incluido un apartado sobre sequías en el que se muestra un estudio comparativo entre dos sequías que afectaron a los Pirineos a finales de los años 80 y a principios del presente siglo, y el papel que han jugado las medidas de adaptación.

9.1 Introducción

Existe una falsa creencia de que las inundaciones constituyen un fenómeno poco común y frecuente en las regiones pirenaicas. Asimismo, apenas se las relaciona con los recursos hídricos. Sin embargo, los hechos demuestran lo contrario. Baste pensar en las inundaciones de octubre de 1940 que afectaron al Pirineo Oriental, tanto en la vertiente francesa como en la española, y en las que algunas fuentes hablan de la superación de más de 900 mm y un centenar de víctimas. O las del 6 al 8 de noviembre de 1982 que asolaron gran parte de Andorra y fueron especialmente violentas también en Catalunya, Aragón y Occitania. O las más recientes del 19 de junio de 2013, famosas por sus efectos en la cuenca del río Garona, pero con graves impactos también en el resto de las cuencas pirenaicas de Lleida y de Huesca. Por otro lado, las inundaciones, que, en el caso del Pirineo se deben a lluvias intensas que excepcionalmente pueden asociarse a deshielo, afectan también gravemente a la calidad del agua, tanto por el aporte sólido y disuelto que arrastran como por la interrupción (cuando no destrucción) de los servicios de depuración y de suministro de agua potable y otros efectos en cascada.

Además de los posibles impactos sobre vidas y bienes, las inundaciones afectan gravemente a la calidad del agua tanto por el aporte sólido y disuelto que arrastran como por la interrupción e incluso destrucción de los servicios de depuración y de suministro de agua. Asimismo pueden afectar a la producción de energía hidroeléctrica y a las instalaciones de regadío.

A todo ello debe añadirse que en numerosas ocasiones dan lugar a deslizamientos de terreno, avalanchas de derrubios o caída de piedras que pueden destrozar canalizaciones, además de cortar vías de comunicación o interrumpir los suministros energéticos. Muy vinculado con su impacto en el recurso hídrico se halla el funcionamiento de los embalses, tanto como reservas hídricas como energéticas. Las lluvias intensas o su propia previsión pueden obligar a su utilización como balsas laminadoras, por lo que, en caso de hallarse próximos al nivel de seguridad, puede ser necesario un cierto vaciado. A ello se une el efecto de colmatación y atarramiento debido al arrastre de la avenida

de entrada que acaba afectando a la vida útil del embalse y al tipo de depósitos remanentes en el fondo.

Por otro lado, los Pirineos y sus regiones colindantes muestran una gran heterogeneidad en la ocupación y usos del territorio, tanto espacial como estacional. Consecuencia de ello es una vulnerabilidad y exposición cambiantes, agravadas por el hecho de que no existe un modelo de gestión y prevención de las inundaciones común, antes bien, seis modelos que responden a las diferentes administraciones regionales y, a su vez, actuaciones a escala municipal y supramunicipal, y otras tantas con otros criterios, a la escala de macizo o parques nacionales/naturales.

En este capítulo se analiza en primer lugar los tipos de estrategias y medidas de adaptación más usuales, desde una perspectiva general. En segundo lugar, se focaliza en las estrategias específicas frente a las inundaciones que existen en los diferentes programas de adaptación, distinguiendo entre estructurales o físicas, sociales e institucionales. Se pasa después a analizar el estado del arte de las medidas de adaptación existentes en la actualidad. Dado que para poder adaptarse es necesario tener un conocimiento en profundidad de la problemática, se introduce la primera base de datos y cartografía de inundaciones realizada a escala de macizo y siguiendo una metodología sistemática que garantice la inclusión de todos los eventos. La última parte se cierra con una propuesta de ciencia ciudadana (FLOODUP) que sea útil para mejorar la adaptación a escala individual.

9.2 Retos del cambio climático en relación con el riesgo de eventos hidrológicos extremos

El impacto del cambio climático sobre la precipitación no es tan evidente como sucede con el impacto sobre la temperatura y los riesgos derivados de la misma, la pérdida de cobertura nival y la subida del nivel del mar. Si bien un aumento de temperatura conlleva un aumento de la capacidad para contener vapor de agua en la atmósfera y un aumento de la energía convectiva potencial disponible, lo que conduce a pensar en un aumento de las lluvias intensas, no es así. Los factores responsables de este tipo de precipitación que es el usualmente asociado a inundaciones, son muy diversos y responden tanto a causas termodinámicas como dinámicas. La consecuencia es que no existe un patrón común en la respuesta de las precipitaciones al cambio climático. Si en el centro y norte de Europa las evidencias y probabilidades de un aumento de las lluvias e inundaciones son altas, en la región Mediterránea esto no es así. Desde la Península Ibérica hasta la Península de Anatolia encontramos regímenes de precipitación muy diversos, como de hecho sucede en el propio macizo de los Pirineos ([Box 9.1](#)).

El cambio climático y la mayor exposición humana (ya sea por el aumento de las residencias o por la proliferación de usos de recreo y descanso) puede aumentar gravemente la incidencia de las inundaciones en los Pirineos en el futuro. Esto se agrava con el creciente aumento del riesgo de incendios, la erosión del terreno y el estado de las cuencas que puede llevar a un gran arrastre de aporte sólido.

El proyecto Interreg Poctefa CLIMPY concluía con una disminución del 2,5% de la precipitación por década, en término medio y con una gran variabilidad interanual, desde 1959, mientras que respecto a las proyecciones en las precipitaciones no se proyectaban cambios significativos (OPCC-CTP, 2019). En la misma línea no detectaba cambios significativos en las lluvias intensas. Una de las dificultades en este tipo de estudio es que la precipitación suele ser a escala diaria o superior, cuando una gran parte de los eventos de inundación súbita son consecuencia de lluvias que duran menos de un día, por lo que no son detectadas. Por ahora, la única información elaborada a escala subhoraria es la de Llasat et al.

Box 9.1: Impactos del cambio climático en los eventos hidrológicos extremos en la región Mediterránea.

Dentro de la regionalización que el IPCC ha seguido en todos sus informes, así como en el First Mediterranean Assessment Report on Environmental and Climate Change (MedECC, 2020), los Pirineos forman parte de la región Mediterránea. En esta región existe un notable acuerdo en el aumento de la duración y frecuencia de las rachas secas, tanto respecto a las tendencias observadas como a las proyecciones futuras. Estos períodos, unido al aumento de temperatura y, consecuentemente, de pérdida evaporativa, apunta a una mayor frecuencia e intensidad de las sequías. En el caso de las lluvias intensas y aunque se espera también un aumento, todavía no hay suficientes evidencias que avalen una tendencia significativa común. Parte de la falta de evidencias reside en que una gran parte de las lluvias intensas en la cuenca Mediterránea se producen a escala subdiaria y no son captadas por las salidas de los modelos. Un problema similar se produce en cuanto a las inundaciones, ya que en general se trata de inundaciones súbitas (flash-floods) que afectan cuencas no aforadas y de las que sólo quedan evidencias cuando se producen daños. La dificultad de detección es mayor en regiones poco pobladas, como es el caso de los Pirineos.

(2021), basada en el estudio de la precipitación a escala 5-minutal, que muestra un aumento de la contribución de la lluvia convectiva en la cuenca alta del Llobregat frente a una disminución en las cuencas pirenaicas ampurdanesas.

Los resultados presentados en el capítulo 3.2 de este libro se hallan en la misma línea que la del proyecto CLIMPY, no siendo posible encontrar una tendencia significativa común de los episodios de inundaciones en el Pirineo. Aún así, los daños sí que están aumentando, por lo que es importante abordar una mejora en las estrategias de adaptación.

9.3 Coordinación de las estrategias de adaptación frente a las inundaciones en los Pirineos

El territorio de los Pirineos y sus regiones colindantes muestran una gran heterogeneidad espacial y temporal en la vulnerabilidad y exposición frente a las inundaciones, agravadas por el hecho de que no existe un modelo de gestión y prevención de las inundaciones común. La búsqueda de las mejores medidas de adaptación requiere un conocimiento previo de los tipos de medidas existentes, sus ventajas y sus límites.

El informe del IPCC (IPCC, 2014) define la adaptación como un proceso de ajuste al clima real o proyectado y sus efectos. En los sistemas humanos, la adaptación trata de moderar o evitar los daños o aprovechar las oportunidades beneficiosas, así como facilitar el ajuste al clima proyectado y a sus efectos. Los distintos tipos de medidas de adaptación se detallan en el Box 9.2.

A continuación se muestra una selección de medidas genéricas de adaptación frente a las inundaciones categorizadas según la clasificación del IPCC que se ha mostrado en el Box 9.2 (Tablas 9.1, 9.2 y 9.3), aunque hay medidas que por sus características podrían situarse en más de una categoría. Las medidas que se muestran provienen de distintos documentos como el mismo informe del IPCC o planes de gestión de riesgos de inundaciones, tanto a nivel europeo como nacional o regional. Junto a cada categoría se indican aspectos que pueden suponer restricciones y que pueden dificultar su implementación.

En la actualidad se están llevando a cabo más de 50 medidas de adaptación frente a las inundaciones en el macizo de los Pirineos. La coordinación interregional e intrarregional y el aprendizaje basado en la experiencia constituyen una buena medida de adaptación frente al impacto del cambio climático en las inundaciones.

Las medidas de adaptación frente a las inundaciones que se proponen en este capítulo se pueden considerar de tipo reactivo en cuanto se van a basar en la evidencia (inundaciones y tendencias observadas), pero también tienen un cierto carácter proactivo dadas las proyecciones que hablan de un posible aumento de las precipitaciones torrenciales y el aumento en la

Tabla 9.1. Medidas estructurales frente a las inundaciones.

Medidas estructurales	Ejemplos	Restricciones
Ingeniería y construcción	Diques, protecciones, presas y embalses de regulación y laminación, encauzamientos, mejora del drenaje de las infraestructuras lineales. Correcciones hidrológico-forestales. Seguimiento actividades extractivas cerca de zonas flujo preferente. Adaptación de infraestructuras de transporte y carreteras, códigos de construcción, adaptación de centrales hidroeléctricas. Cambios ubicación y sistemas protección campings.	Costes, impacto ambiental, impactos colaterales (desplazamiento población, efectos en cascada, fallos críticos), “levee effect”. Incertidumbre asociada a los escenarios futuros. “Longevidad” de algunas infraestructuras.
Tecnología	Tecnologías de monitoreo y mapeo de riesgos, sistemas de construcción tradicionales. Alerta hidrometeorológica: sistemas alerta temprana, redes vigilancia, sistemas información hidrológica, inventario y mejora de puntos de control pasivos, mejoras de pronóstico meteorológico, plataformas de investigación. Tecnologías para la difusión de alertas y para procesos de crowdsourcing.	Límites computacionales, criterios diferentes entre organismos, cadena comunicación, incremento incertidumbre. Dificultades (tecnológicas/culturales/sociales) de acceso.
Soluciones basadas en la naturaleza	Adaptación basada en los ecosistemas: reforestación cuencas, mantenimiento y conservación de cauces. Restauración y conservación humedales y marismas. Instalación de “setos” para frenar crecidas. Infraestructuras verdes en zonas urbanas: parques urbanos, tejados verdes, pavimentos permeables, sistemas drenaje sostenibles, corredores verdes.	Requiere cooperación entre instituciones. Medidas con elevado coste y que requieren grandes superficies (vs. elevada demanda del suelo), competencia con otros usos (vías de comunicación, ...).
Servicios	Redes comunitarias de soporte, limpieza sistemas drenaje (cloacas), espacios públicos abiertos en caso de emergencias o recuperación post-evento. Infraestructura que garantice correcto funcionamiento servicios básicos (agua, luz, carreteras, vías de tren, transporte público...). Sistemas de alerta temprana, emergencia y rescate para practicantes de deportes de montaña (barranquismo, excursionismo), establecimientos turísticos vulnerables (campings), población aislada... Diversificación oferta turística (fomento patrimonio y cultura). Servicios atención y soporte pastores/transhumancia.	Desconocimiento del ciclo del agua urbano, vandalismo, comportamientos que dañan o ensucian calles, cloacas, ... Baja resiliencia de las infraestructuras frente a los fenómenos meteorológicos extremos.

exposición en determinadas zonas del Pirineo. Según la propuesta del IPCC (Box 9.2), se trataría de medidas sociales encaminadas a la mejora del comportamiento, educación e información de la población. También tendrían una componente institucional ya que proporcionan información a la administración pública a escala local, regional y supranacional a fin de que puedan llevar a cabo las medidas económicas, programas, regulación sobre usos del suelo, etc.

Atendiendo a la clasificación anterior, en

este apartado se muestra una recopilación de las medidas y estrategias de adaptación existentes frente al riesgo de inundaciones en los Pirineos. Se trata de la primera propuesta de adaptación, ya que, aunque parezca simple, no se ha desarrollado hasta ahora un mapeo como el que aquí se presenta y que es una buena herramienta de adaptación en base a la mejora de la coordinación y el aprendizaje mutuo a partir de otras experiencias. La Tabla 9.4 muestra el número de medidas existentes agrupadas en cinco clases atendiendo al apartado anterior. La Tabla

Tabla 9.2. Medidas sociales frente a las inundaciones.

Medidas sociales	Ejemplos	Restricciones
Comportamiento	Adaptación basada en la comunidad (redes sociales), reducción vulnerabilidad, empoderamiento. Preparación de la vivienda y plan de evacuación, conservación del agua, diversificación medios subsistencia, redes sociales	Falta de sensación de pertenencia a una comunidad o de identidad de la comunidad, individualismo. Bajo nivel educativo y económico. Fenómenos de marginación y gentrificación por motivos culturales o económicos. Desigualdad en cuestión de género.
Educación	Recopilación información histórica, integración en programas educativos, capacitación técnica, talleres..., actividades sensibilización, exposiciones, ciencia/participación ciudadana, redes sociales, APPs Aprendizaje-servicio Compartir conocimiento local y tradicional, memoria histórica, redes de investigación, generación de índices holísticos para la comunicación del riesgo y la alerta. Incremento de los equipamientos de educación ambiental y guías de montaña.	Memoria corto plazo, falsa sensación de seguridad, no suficiente información pública, vivencias y experiencias individuales/colectivas diferentes. Acceso desigual a la educación y actividades educativas informales.
Información	Cartografía, mapas de riesgos, servicios climáticos, sistemas alerta temprana, predicciones meteorológicas, series de datos. Información dirigida a turistas e inmigrantes. Servicios de alerta y emergencia. Plataformas información (Adaptecca, Climate-Adapt,...). Análisis/estudios post-evento. Indicadores y monitorización	Incomprensión de los mensajes, acceso complejo la información, barreras tecnológicas. Baja confianza. Complejidad en generación y mantenimiento de bases de datos. Su uso comporta cambios débiles a corto plazo y de evaluación compleja.

Tabla 9.3. Medidas institucionales frente a las inundaciones.

Medidas institucionales	Ejemplos	Restricciones
Económicas	Seguros, CCS, AGROSEGUROS, ENESA, Declaración de zona afectada gravemente por una emergencia de protección civil (Ley 17/2015). Programas UE (LIFE, FEADER, FEDER, FSE...), España: PIMA, Fund. Biodiversidad, programas autonómicos Pagos por servicios ecosistémicos	Sistemas re-aseguro no siempre favorecen buenas prácticas. Impopular (impuestos) o caro (ayudas). Incertidumbre en su utilidad para cambiar comportamientos.
Políticas gubernamentales y programas	Protección civil, gestión emergencia. Planes de adaptación europeos, nacionales, regionales, municipales (Directriz básica ante riesgo de inundaciones,...) protocolos evacuación, mejora comunicación alerta. Evaluación y gestión de riesgos de inundación, participación ciudadana en planes. Planificación y gestión de cuencas. Coordinación administrativa entre todos los actores involucrados en la gestión del riesgo. Agendas 2030 locales.	Falta (o no aplicación) de planes locales, falta de mapas de evacuación. Implementación difícil por falta de prioridad/ interés político. Necesidad de cooperación de diferentes actores.
Leyes y regulaciones	Planificación y ordenación territorial: Zonificación zonas inundables, regulación usos suelo, Planes urbanísticos autonómicos y municipales, Regulación Dominio Público Hidráulico, normativa construcciones Leyes para la reducción de desastres, figuras protección de áreas.	Dificultades de acceso a mapas, difícil comprensión, intereses (cambios precios suelo). En ocasiones impopular (por su imposición) y de riesgo político. Requiere seguimiento, inflexibilidad. Implementación cara.

Box 9.2: Clasificación de las medidas de adaptación.

Existen numerosas propuestas para clasificar las medidas de adaptación, siendo las más usuales las siguientes:

-Anticipada o Pro-activa: se produce antes de que se observen impactos del cambio climático, en base a los escenarios climáticos. Reactiva: se produce como respuesta a evidencias, después de observarse impactos del cambio climático.

-Planificada: el proceso de adaptación es resultado de una decisión política deliberada como respuesta a cambios observados o esperados. Autónoma o espontánea: se produce según la propia evolución de los sistemas, no como respuesta consciente al cambio climático. (cambios ecológicos en los sistemas naturales, cambios en el mercado, ...),

-Incremental o progresiva: el objetivo central del proceso es mantener la integridad del sistema actual (tecnológico, institucional, gobernanza...). Transformacional: su objetivo principal es cambiar atributos fundamentales de sistemas en respuesta al clima actual o al esperado y sus efectos. Este tipo de adaptación suele ser más ambicioso y para una escala mayor que la incremental.

-Privada: aquella llevada a cabo por individuos, colectivos o empresas privadas. Pública: aquella realizada por una entidad gubernamental (municipal, regional...)

Existen sin embargo otras clasificaciones, atendiendo a la extensión de las medidas o a otros factores. Así, se califican las medidas como:

- gris (grey) o blanda (soft);
- opciones no-regrets, low-regrets o win-win;
- con beneficios a corto o a largo plazo;
- localizadas espacial o sectorialmente o generalizadas;
- de carácter normativo o con enfoque orientativo o promocional;
- individual o colectiva;
- implícita o explícita;
- de protección, de acomodación o de retroceso.

Según el 5º Informe del IPCC (IPCC, 2014), las clasifica tal como sigue:

- Estructurales/físicas: ingeniería y construcción; tecnología; servicios; basadas en la naturaleza.
- Sociales: comportamiento; educación; información.
- Institucionales: económicas; políticas gubernamentales y programas; leyes y regulaciones.

9.5 desarrolla cada una de las medidas mientras que la Figura 9.1 muestra un mapeo con la distribución de las medidas por territorios.

Para elaborar el presente listado se han consultado diferentes plataformas como ADAPTECCA, CLIMATE-ADAPT y OPCC. También se han consultado diferentes planes de adaptación al cambio climático y otros informes. Se ha organizado de acuerdo con la

clasificación indicada en el anterior apartado, aunque en algunos casos el recurso identificado se puede situar en diversas categorías dado su carácter transversal. La Tabla 9.5 detalla las diferentes medidas existentes en la actualidad y la localización de la información en caso de que se desee consultar.

La Figura 9.1 muestra la distribución de las diferentes medidas de adaptación que en la

actualidad ya existen en las siete regiones pirenaicas consideradas. Se observa un cierto dominio de los estudios/informes/proyectos de investigación, sobre todo en Andorra y Navarra. Las medidas institucionales/económicas dominan en las regiones francesas y en el caso de Cataluña y Aragón ocupan un lugar similar a las anteriores, así como las institucionales/normativas-estrategias-planes, que en el caso de el País Vasco son las que más peso tienen.

Tabla 9.4. Resumen de las medidas frente a las inundaciones en los Pirineos existentes en la actualidad.

Tipos medidas recopiladas	Número	Ejemplo
Estructurales	10	Restauración espacios naturales, diques...
Sociales	10	Cartografía de riesgos en Andorra (AN-Haz-01)
Guías, manuales de buenas prácticas	12	Guía para la Reducción de la Vulnerabilidad de los Edificios Frente a las Inundaciones (MAPAMA,...)
Estudios, informes y proyectos de investigación	8	Proyecto LIFE Nadapta. Estrategia integrada para la adaptación al cambio climático en Navarra
Institucionales	14	Estrategia Vasca de Cambio Climático 2050

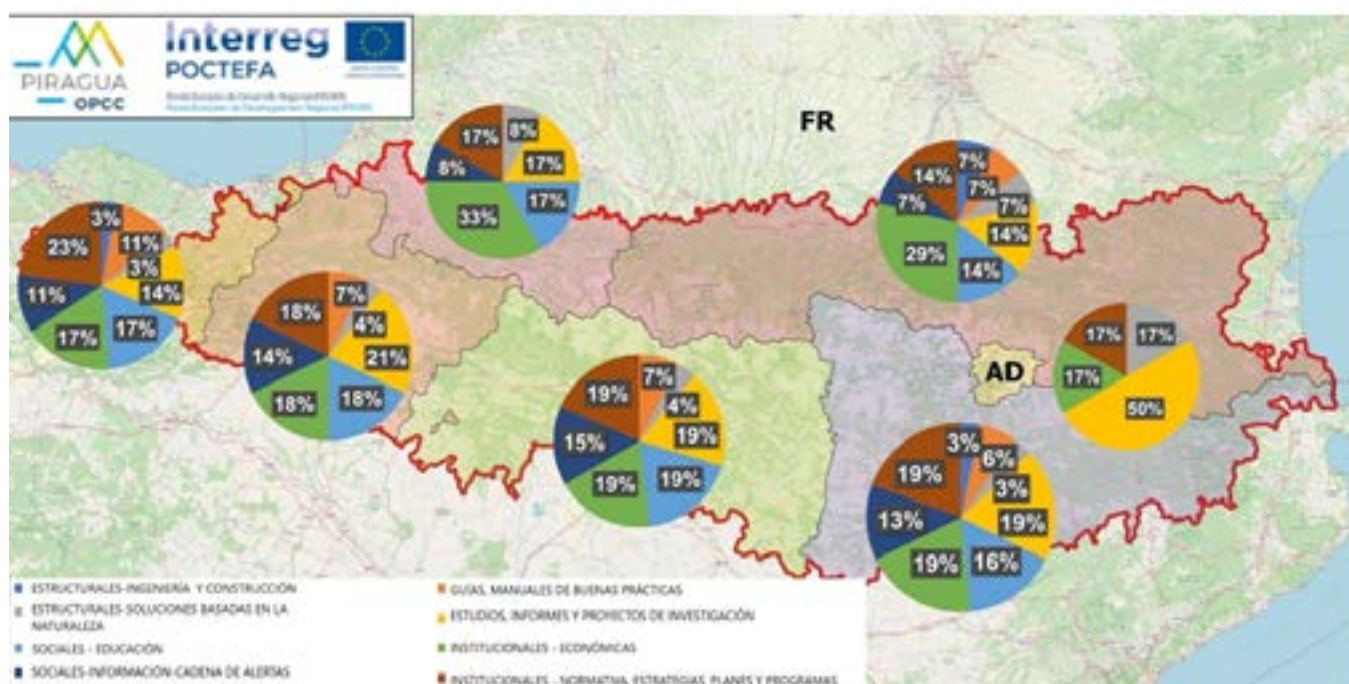


Figura 9.1. Mapeo de las medidas de adaptación frente a inundaciones en la región Pirenaica.

(Fuente: elaboración propia.)

Tabla 9.5. Medidas existentes frente a las inundaciones en los Pirineos.

Medida	Año	Referencia
Estructurales: Ingeniería y construcción		
Mejora de la adaptación mediante diques y presas	2015	CLIMATE-ADAPT
Retirada de áreas de alto riesgo	2015	CLIMATE-ADAPT
Estructurales: soluciones basadas en la naturaleza		
Setos frente a inundaciones en el sur de Francia	2015	CLIMATE-ADAPT, European Natural Water Retention Measures (NWRM) platform
Restauración fluvial de los ecosistemas de los ríos Arga y Aragón, España	2015	CLIMATE-ADAPT, European Natural Water Retention Measures (NWRM) platform
Restauración ambiental de marismas de la Vega del Jaizubia	2017	ADAPTECCA
Recuperación medioambiental de la ribera derecha del río Oria	2017	ADAPTECCA
Rehabilitación y restauración de ríos y llanuras fluviales	2019	CLIMATE-ADAPT
Espacios y corredores verdes en áreas urbanas	2015	CLIMATE-ADAPT
Establecimiento y restauración de vegetación de ribera como medida de mitigación.	2015	CLIMATE-ADAPT
Gestión forestal sensible a los usos del agua.	2015	CLIMATE-ADAPT
Sociales: educación		
Desarrollo de una cultura del riesgo	2013	OPCC, 2013
Sociales: información y cadenas de alertas		
Indicador global de adaptación a los impactos del cambio climático en Cataluña	2014	CLIMATE-ADAPT
Establecimiento de sistemas de alerta temprana	2015	CLIMATE-ADAPT
Implementación de sistemas de monitoreo continuo y Vigilancia permanente de los caudales (TRA -Wat-10 y TRA-Wat-11 y TRA-Wat-13)	2013	
Cartografía de riesgos en Andorra (AN-Haz-01)	2013	OPCC, 2013
Cartografía de inundaciones Ebro (TRA-Wat-14)	2013	OPCC, 2013
Cartografía de inundaciones en Navarra (TRA-Wat-18)	2013	OPCC, 2013
Implementación de red de seguimiento y análisis del recurso e información en tiempo real en la CHE (Prevención de inundaciones y gestión del recurso agua)	2011	OPCC, 2013b
Proyecto evolución de los bosques de montaña y clima (TRA-FOR-02)	2013	OPCC, 2013
Prevención de inundaciones y gestión del recurso agua.	2013	CHE
Implementación de red de seguimiento y análisis del recurso e información en tiempo real	2013	OPCC, 2013
Sociales: guías y manuales de buenas prácticas		
Guía para la Reducción de la Vulnerabilidad de los Edificios Frente a las Inundaciones	2017	ADAPTECCA
Soluciones Naturales para la adaptación al cambio climático en el ámbito local de la Comunidad Autónoma del País Vasco	2017	ADAPTECCA
Buenas prácticas en medidas locales de adaptación al cambio climático aplicables al País Vasco	2017	ADAPTECCA
Adaptación al cambio climático de las entidades locales desde el planeamiento urbanístico. Guía metodológica para municipios navarros. Propuesta de instrucciones técnicas de planeamiento	2018	ADAPTECCA
Normas resistentes al clima para el diseño, la construcción y el mantenimiento de carreteras	2020	CLIMATE-ADAPT

Medidas de operación y construcción para garantizar una infraestructura ferroviaria resistente al clima	2021	CLIMATE-ADAPT
Sistemas hidrometeorológicos de seguimiento, modelado y previsión	2021	CLIMATE-ADAPT
Guías de adaptación al riesgo de inundación: sistemas urbanos de drenaje sostenible	2019	ADAPTECCA
Guías de adaptación al riesgo de inundación: explotaciones agrícolas y ganaderas	2019	ADAPTECCA
Soluciones. Casos prácticos de adaptación al cambio climático	2020	ADAPTECCA
Guía para la resiliencia local oportunidades y retos de la economía local y la sociedad para adaptarse al cambio climático	2020	ADAPTECCA
Guía de adaptación de destinos turísticos al cambio climático. Destinos de montaña: el Pirineo Aragonés	2020	ADAPTECCA
Sociales: estudios, informes y proyectos de investigación		
Estudio sobre los seguros de riesgos de catástrofes meteorológicas y climáticas: inventario y análisis de los mecanismos de apoyo a la prevención de daños en la UE	2017	ADAPTECCA
Desarrollo de una metodología para la implementación de infraestructuras verdes como medida de adaptación al cambio climático en zonas de montaña de la Península Ibérica (Informe final Proyecto IVERCAM)	2018	ADAPTECCA
Proyecto Climate Change Adaptation Practices Across the EU	2017	CLIMATE-ADAPT
Proyecto LIFE Nadapta. Estrategia integrada para la adaptación al cambio climático en Navarra	2017	Mapa buenas practicas adaptacion OPCC
Centro de investigación de excelencia BC3 (Basque Centre for Climate Change)	2017	ADAPTECCA
Proyecto europeo interregional «Territorios fluviales de Europa», que concierne a Navarra, Midi-Pyrénées y Aquitania (TRA-Wat-17).	2013	OPCC, 2013
Riesgo de inundación en España: análisis y soluciones para la generación de territorios resilientes	2021	ADAPTECCA
Adapting to rising river flood risk in the EU under climate change (PESETA IV project)	2020	ADAPTECCA
Institucionales: económicas		
Financial tools for risk management	2015	CLIMATE-ADAPT
Plan PIMA Adapta AGUA	Desde 2015	
Compensación económica de bienes asegurados (CCS) o daños agrarios (AGROSEGURO, ENESA) (España)		RD 307/2005
Ayudas, créditos preferentes... Declaración de zona afectada gravemente por una emergencia de protección civil (España)		Ley 17/2015
Institucionales: normativa, estrategias, planes y programas		
Estrategia de Adaptación al Cambio Climático en la Costa Española	2016	ADAPTECCA
Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2021-2030	2021	ADAPTECCA
Estrategia Española de Cambio Climático y Energía Limpia	2007	ADAPTECCA
Adaptación a la Directiva de Inundaciones Europea	2019	CLIMATE-ADAPT
Plan Vasco de Lucha contra el Cambio Climático 2008-2012	2012	ADAPTECCA
Estrategia Vasca de Cambio Climático 2050	2015	ADAPTECCA
Estrategia de gestión del riesgo de inundación realizada por la Agencia Vasca del Agua (EK-Wat- 03)	2013	URAGENTZIA
Programa de medidas del ámbito hidrológico	2019	Pla de gestió del risc d'inundació del districte de conca fluvial de Catalunya
Estrategia de Adaptación al Cambio Climático en los Pirineos.	2021	OPCC
Estrategia europea de adaptación al cambio climático (2021)	2021	ADAPTECCA

9.4 Dos experiencias piloto para la mejora del conocimiento y la participación ciudadana en la adaptación al riesgo de inundación en los Pirineos

Se puede afirmar que existe una baja percepción del riesgo de inundaciones en la región Pirenaica: las crecidas son más frecuentes y tienen un mayor impacto de lo que sus habitantes y foráneos perciben. Es por ello por lo que la primera medida de adaptación se basa en la mejora del conocimiento del citado riesgo. Así, en el proyecto PIRAGUA se han llevado a cabo dos iniciativas para mejorar el conocimiento y la evaluación del riesgo de inundación en la región Pirenaica, así como para dar a conocer esta información e involucrar a la ciudadanía: la base de datos PIRAGUA_flood y la aplicación FLOODUP.

9.4.1 La base de datos PIRAGUA_flood

La base de datos PIRAGUA_flood (Llasat et al., 2022) es la primera compilación a escala de todo el macizo pirenaico de episodios de inundación a escala municipal, y se ha realizado a partir de una búsqueda intensiva y exhaustiva de información para el período 1981-2015. Se han consultado todas las bases de datos oficiales a escala nacional y territorial, así como prensa e informes científicos. El resultado es una base de datos de libre acceso y descarga a través de una licencia de uso abierto (open source), que contiene todos los episodios de inundaciones identificados, clasificados en función de la gravedad de sus impactos y con una resolución espacial municipal. La metodología, fuentes de información y criterios utilizados para la clasificación de los eventos se ha detallado en Zabaleta et al. (2023). Los principales resultados del análisis de la base de datos se sintetizan en el Box 9.3.

En el periodo 1981-2015 se han registrado 181 eventos de inundación en los Pirineos. La creación de una base de datos de episodios de inundación a escala municipal y su difusión interactiva a través de la plataforma del Observatorio Pirenaico del Cambio Climático es una medida de adaptación basada en la mejora del conocimiento del territorio frente a los extremos y del impacto socioeconómico de los mismos.

La Figura 9.2 muestra la frecuencia con que se han registrado episodios de inundación con daños notables (catastróficos y extraordinarios) en cada uno de los municipios pirenaicos entre 1981 y 2015, destacándose la región oriental que comprende parte de Occitania y Cataluña, y en segundo lugar los Pirineos centrales.

El análisis de tendencias muestra un aumento significativo de los episodios de inundaciones en la región pirenaica considerada en su totalidad, consecuencia sobre todo del aumento de los episodios de carácter extraordinario, la mayor parte de ellos producidos por lluvias intensas y locales. Las regiones de Aquitania y Occitania también presentan un aumento significativo de inundaciones, sobre todo por el aumento de las extraordinarias en la primera región, y de las ordinarias, en la segunda. Este aumento puede estar vinculado total o parcialmente a un aumento de la exposición y la vulnerabilidad, consecuencia de la mayor ocupación del territorio, de las actividades en la montaña y de los bienes expuestos. Bajo la influencia del cambio climático se prevé un aumento de las lluvias intensas, tanto en magnitud como en frecuencia, lo que llevaría también a un aumento de inundaciones catastróficas.

Una de las medidas de adaptación frente el

impacto del cambio climático y sus impactos es difundir este tipo de información a la población a través de cartografías. Por ello, aparte de la propia base de datos y los resultados analizados en Zabaleta et al. (2023), la cartografía asociada y toda la información de la base de datos se puede consultar de forma interactiva a través del Geoportal del Observatorio Pirenaico del Cambio Climático (OPCC) (<https://www.opcc-ctp.org/es/geoportal>), en la sección Hidrología. En relación con las inundaciones se han incorporado varias capas cartográficas con el número de episodios de inundaciones entre 1981 y 2015 a nivel municipal, por clases de magnitud (Figura 9.3).

En el mapa los municipios aparecen con una escala graduada de azules en función del número de episodios total que se han registrado en el periodo (Figura 9.4).

Al hacer clic sobre un municipio en particular es posible conocer el número total de eventos y el número de cada categoría según el impacto del episodio: los catastróficos han producido grandes daños en algún lugar de los Pirineos con destrucción total o parcial de infraestructuras; los extraordinarios han producido daños en bajos, sótanos, campos, servicios (electricidad, etc.), red de transportes, etc.; los ordinarios se refieren

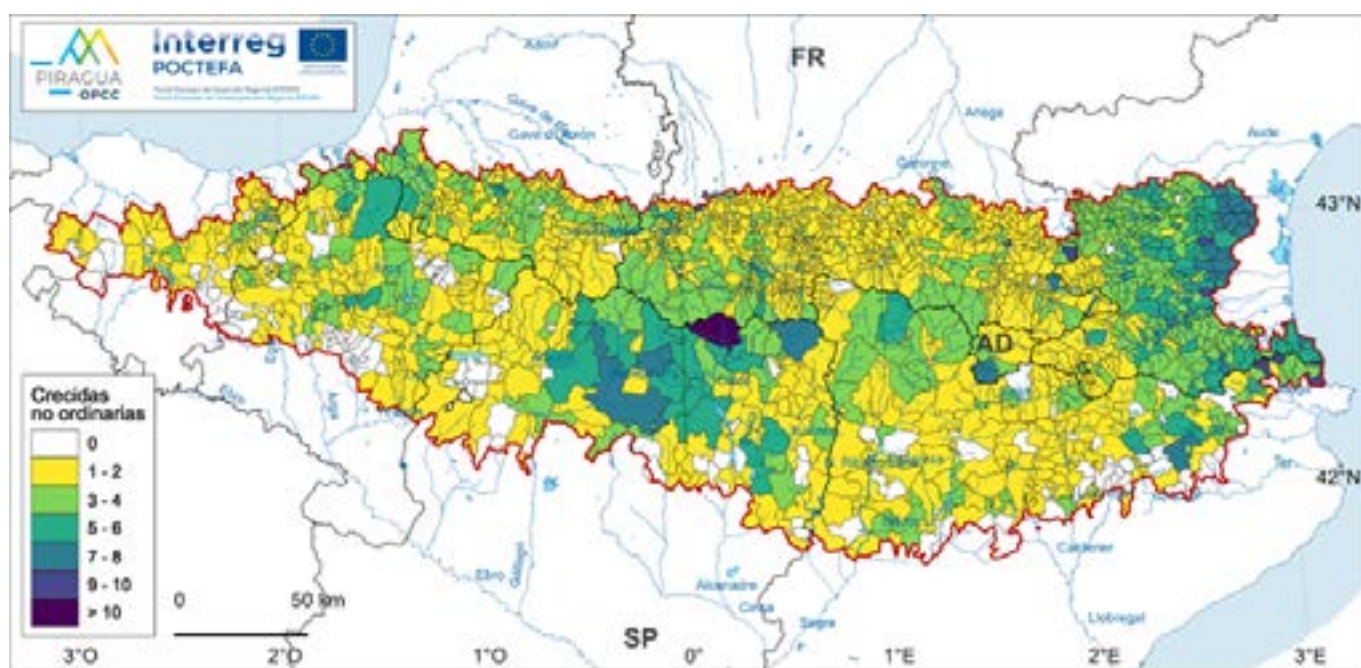


Figura 9.2. Número de episodios de inundación con daños extraordinarios y catastróficos que han afectado cada municipio entre 1981 y 2015.

(Fuente: Zabaleta et al., 2023.)

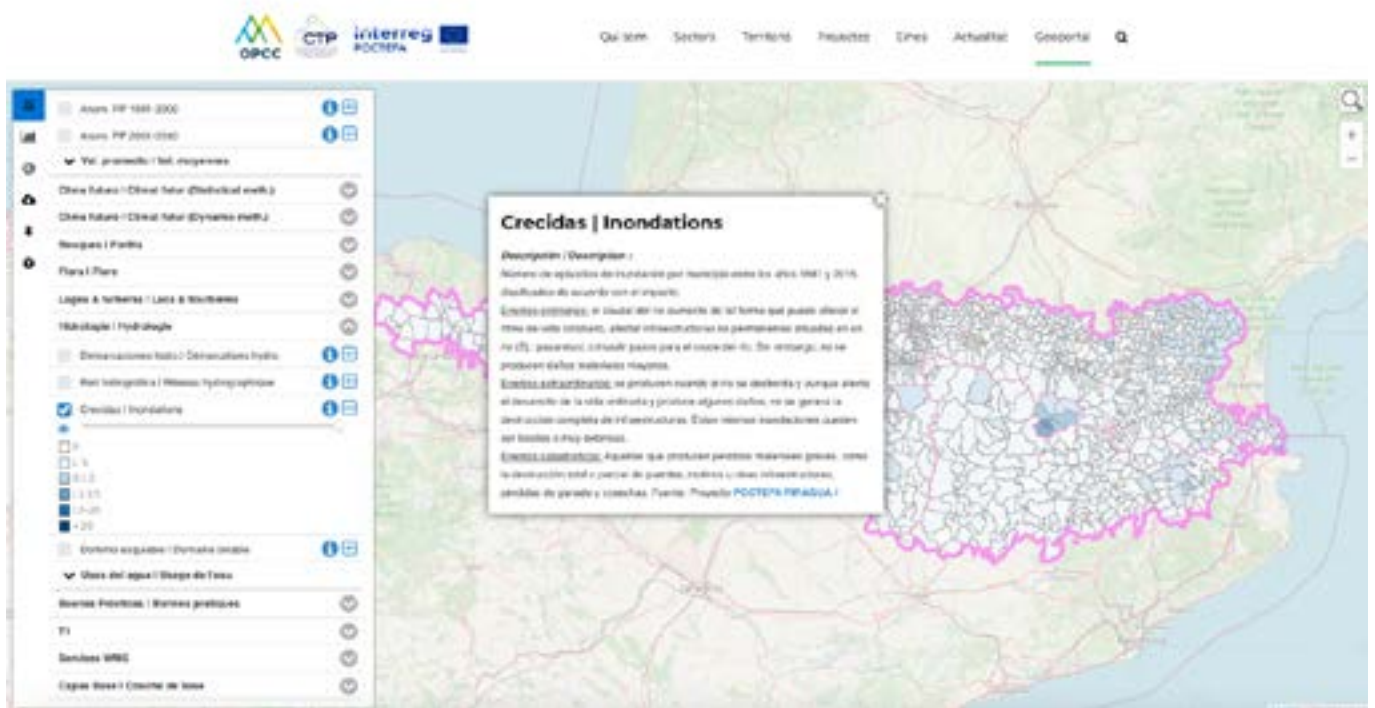


Figura 9.3. Descripción de la capa de número de crecidas en el Geoportal del Observatorio Pirenaico del Cambio Climático.

(Fuente: OPCC, <https://www.opcc-ctp.org/ca/geoportal>).

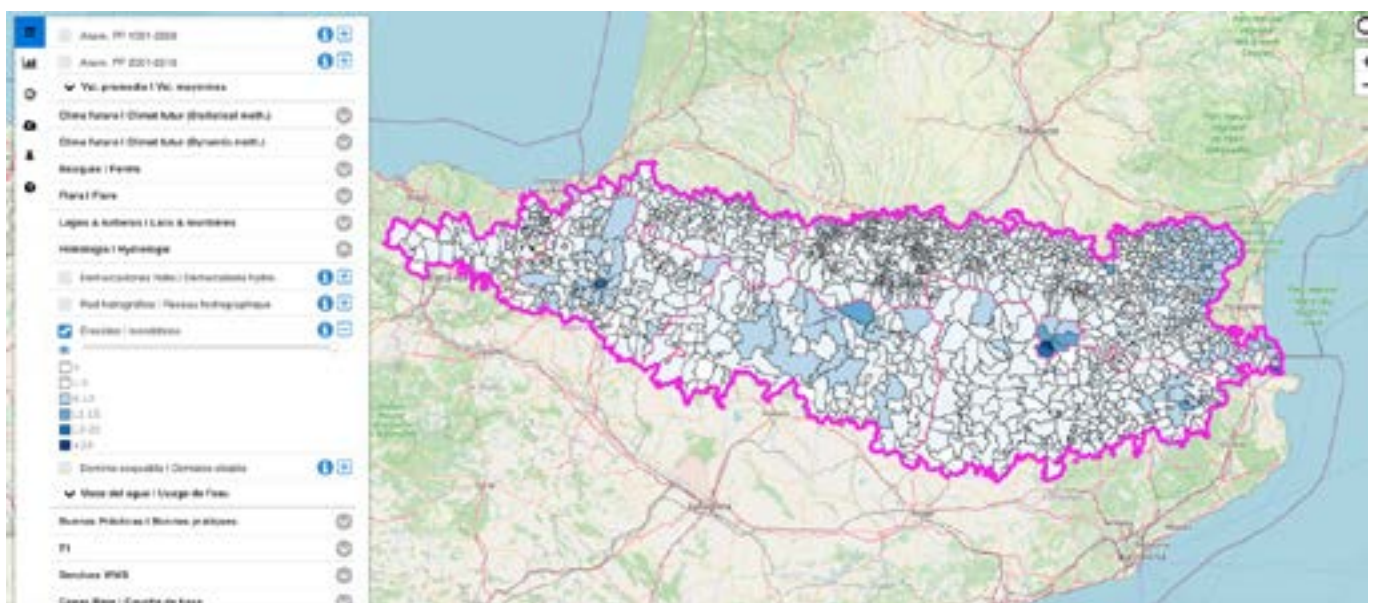


Figura 9.4. Capa de número de crecidas por municipio coloreado según el número de episodios identificados entre 1981 y 2015.

(Fuente: OPCC, <https://www.opcc-ctp.org/ca/geoportal>).

usualmente a crecidas súbitas muy locales que apenas producen daños pero son capaces de arrastrar vehículos e incluso personas (Figura 9.5).

La difusión de una cartografía de episodios de inundación a resolución municipal y de la base de datos asociada a través de la plataforma del OPCC es una medida de adaptación basada en la mejora del conocimiento del territorio, útil para la gestión del territorio, la sensibilización de la población y el desarrollo de soluciones. Consecuentemente está en sinergia con los planes de adaptación nacionales e internacionales.

La adaptación ante el cambio climático y las inundaciones requiere la sinergia entre políticas de distintos niveles. Ésta es una de las grandes apuestas de la Comisión Europea para la adaptación frente al cambio climático. Así, la implementación de la Directiva de Inundaciones va en línea con la implementación de las Directivas de Hábitats y de Aves, red Natura 2000. También se vincula con políticas del suelo y agricultura en zonas inundables (EU Common Agricultural Policy), la gestión de los bosques (EU Forest Strategy, 2013) y la evaluación del impacto ambiental (Environmental Impact Assessment/ Strategic Impact Assessment, EIA/SEA).

En este apartado se muestran las sinergias del caso presentado con el PNACC y la estrategia europea.

Sinergias con el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC 2021) 2021-2030:

- Línea de acción 1.5. Capacitación para el uso de información climática (visores, plataformas de descarga de datos...).
- Línea de acción 3.4. Gestión coordinada y contingente de los riesgos por inundaciones.
- Línea de acción 15.1. Evaluación prospectiva de riesgos de desastres considerando las proyecciones y escenarios de cambio climático.
- Línea de acción 15.3. Apoyo y refuerzo a la preparación ante el Riesgo de desastres: observación, alerta temprana, comunicación y educación con criterios de adaptación al cambio climático.

Sinergias con la estrategia de adaptación al cambio climático de la UE (febrero 2021):

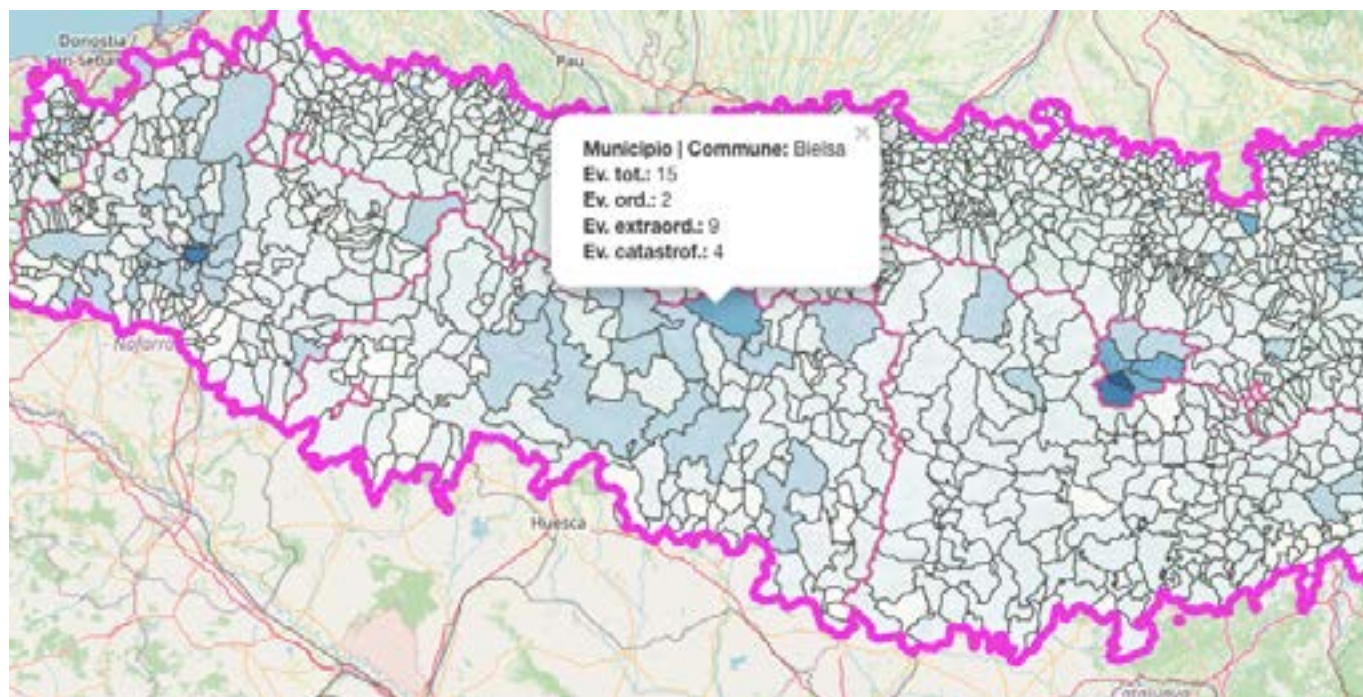


Figura 9.5. Menú emergente mostrando el número de episodios dentro clasificados por su impacto, para el municipio de Bielsa (provincia de Huesca).

(Fuente: OPCC, <https://www.opcc-ctp.org/ca/geoportal>).

Box 9.3: Síntesis de la base de datos PIRAGUA_flood.

En el periodo 1981-2015 se han producido 181 eventos de inundación en los Pirineos, de los cuales 128 han afectado la parte española, 43 la parte francesa, y 46 a Andorra. Algunos de ellos han sido comunes a dos o tres países, habiéndose identificado 41 episodios transregionales. Las regiones con un mayor número de episodios de inundación en dicho período son Cataluña (66) y Andorra (46). De hecho, a escala municipal el mayor número de episodios se ha registrado en Andorra la Vella (27), aunque Pamplona es el municipio que ha registrado el mayor número de episodios con daños importantes (17). A nivel de toda la región, 29 episodios han producido daños muy graves y por ello se han considerado catastróficos; 92 han producido daños notables, aunque menores que en el caso anterior y se consideran por tanto extraordinarios; y 60 episodios han producido desbordamientos, avenidas o inundaciones locales con daños menores, y se consideran ordinarios.

Entre 1996 y 2015 el Consorcio de Compensación de Seguros indemnizó por inundaciones un total de 142,5 millones de Euros en la vertiente pirenaica española. El número total de víctimas por inundación ha sido de 121 en España, 31 en Andorra, y 20 en Francia. Mientras que el caso del Camping Las Nieves de Biescas, en agosto de 1996, ha sido el más mortífero con 87 víctimas mortales, fue en noviembre de 1982 cuando se registró el episodio más extenso y costoso a escala de macizo, sobre todo por los daños padecidos en Andorra.

En relación con la cartografía mostrada: “Los datos sobre los riesgos y las pérdidas relacionados con el cambio climático son cruciales para mejorar la precisión de las evaluaciones de riesgos climáticos... Promoverá y apoyará el uso de su centro de datos sobre riesgos para armonizar el registro y la recopilación de datos exhaustivos y pormenorizados sobre riesgos y pérdidas relacionados con el cambio climático, y fomentará colaboraciones público-privadas a escala nacional para recopilar e intercambiar dichos datos”.

9.4.2 Las inundaciones en los Pirineos en el contexto del cambio climático: FLOODUP, un proyecto educativo y de ciencia ciudadana

A lo largo del proyecto PIRAGUA ha sido posible compartir y conocer experiencias orientadas al aumento de la sensibilización de la población frente al riesgo de las inundaciones. Estas prácticas también tienen como objetivo que se produzcan cambios en la sociedad que la hagan más resiliente frente a este riesgo.

Entre estas medidas destacan las siguientes:

- Conocer el fenómeno: diferentes tipos de eventos de inundaciones.
- Conocer su territorio: catálogo de inundaciones en el Pirineo 1981-2015, cuándo y cómo. Impactos.
- Tomar medidas preventivas: identificación de zonas de riesgo, ocupación del suelo, valores expuestos.
- Estar alerta a las previsiones: mejora de la predicción (límites y mejoras potenciales) y de la cadena de alertas.
- Tener en cuenta los planes de emergencia y la capacidad de respuesta: análisis de vulnerabilidad
- Recordar que la propia seguridad y la de los demás depende de cada uno por lo que se requiere colaboración para resolver el problema: procesos de participación y “empoderamiento”, ciencia ciudadana, colaboración interregional.
- Intervenir en la “construcción” del futuro: escenarios, soluciones basadas en la naturaleza.

En este contexto, se ha desarrollado un caso de estudio piloto de ciencia ciudadana como

Box 9.4: Los proyectos de ciencia ciudadana como estrategia de adaptación.

La ciencia ciudadana comprende aquellas investigaciones realizadas de manera parcial o total por ciudadanos, en las que es necesario que los participantes realicen una contribución activa y sean conscientes de su participación. Los proyectos de ciencia ciudadana se pueden clasificar en función del nivel de implicación que tengan los participantes. En su nivel más básico los participantes actúan como sensores o contribuyendo con datos, pero sin implicarse en otras fases de la investigación. Los proyectos de crowdsourcing se encontrarían en esta categoría. En general, requieren de la participación de un elevado número de personas. En un siguiente nivel se encuentran aquellos proyectos en los que los participantes deben realizar una microtarea u observación básica. En estos proyectos ya es necesario que haya una preparación de los participantes, aunque sea una formación mínima. Las redes de aficionados de observación meteorológica se suelen situar en este nivel. En un nivel siguiente los participantes pueden participar en la definición del problema, el diseño de la metodología, la recogida de datos, el análisis... es decir en un mayor número de fases del proceso investigador. Requiere una mayor preparación porque los participantes tienen un rol mucho más activo y protagonista. En este nivel se suelen situar, entre otros, proyectos que nacen de la ciudadanía como podría ser la demanda de evaluar el nivel de contaminación atmosférica de una zona determinada y para ello instalar (y en ocasiones construir) sensores para su medición. En el nivel más extremo todo el proyecto de investigación corre a cargo de personas no profesionales y si hay investigadores profesionales su rol es de facilitador.

Cada vez hay más acuerdo en que es necesario realizar aproximaciones bottom-up, participativas y basadas en la comunidad en los estudios de resiliencia ante el cambio climático (IPCC, 2014; PNACC, 2021; Paul et al, 2019). En los últimos años se han producido grandes progresos en la ciencia ciudadana gracias a avances tecnológicos, convirtiéndola en una gran oportunidad. Esta participación, además, supone una importante contribución para disponer de más información sobre los impactos y necesidades, especialmente en zonas de las que no es fácil disponer de datos. Por último, los procesos participativos de investigación tienen un importante potencial educativo y de sensibilización y transformador. La ciencia ciudadana es muy útil para realizar estudios post-episodio, ya que permite disponer de la máxima cantidad de información posible más allá de las tradicionales fuentes de información como la prensa o informes oficiales (Llasat-Botija et al, 2018 y 2019).

estrategia de adaptación ante el cambio climático (Box 9.4). FLOODUP es un proyecto de ciencia ciudadana y educativo cuya finalidad es recopilar información sobre riesgos naturales y cambio climático, especialmente inundaciones y sequías, y al mismo tiempo sensibilizar, educar y empoderar a la población para disminuir su impacto y aumentar su resiliencia.

La ciencia ciudadana y los procesos participativos constituyen una buena estrategia de adaptación al cambio climático y las inundaciones. Permiten conocer, aprender, cocrear y participar en la toma de decisiones, favoreciendo una actitud más responsable.

Los objetivos de FLOODUP como herramienta de adaptación al cambio climático y las

inundaciones en los Pirineos son los siguientes:

- Mejora de la capacidad de adaptación del territorio frente al cambio climático a través del conocimiento y la ciencia ciudadana.
- Incrementar la información y datos disponibles sobre los impactos de los riesgos hidrometeorológicos en los Pirineos útil para la comunidad científica.
- Recuperar la memoria histórica de los episodios de inundaciones y sequías y convertirse en un repositorio de episodios, conocimientos y prácticas.
- Mejorar la educación y sensibilización de la población sobre el cambio climático y su impacto en las

inundaciones y sequías.

- Proporcionar una herramienta para el desarrollo de procesos participativos.
- Hacer visible el impacto del cambio climático al resto del territorio más allá de los Pirineos.
- Además, se pueden indicar sub-objetivos relacionados con capacidades y comportamientos:
- Observar y descubrir el entorno con una mirada científica.
- Aprender que no se ha de construir en zonas inundables.

Mejorar la capacidad de autoprotección y los comportamientos prudentes; Compartir buenas prácticas.

Dentro del proyecto se ha desarrollado una App, una web educativa (<https://www.floodup.ub.edu>) y materiales educativos, y también tiene un perfil de twitter. La web educativa presenta el proyecto y proporciona información sobre inundaciones con diferentes niveles de complejidad. A través de la web se puede acceder a las otras herramientas del proyecto como las encuestas post-episodio (tras un episodio de inundaciones)

y el mapa (Figura 9.6). También se han realizado actividades educativas y talleres participativos (Box 9.5).

La Aplicación para móviles o App FLOODUP tiene como objetivo facilitar la recopilación de la información mencionada anteriormente (observaciones de impactos de riesgos hidrometeorológicos y cambio climático, buenas prácticas de adaptación y malas prácticas). Se ha desarrollado para teléfonos móviles Android y IOS en castellano, francés, catalán, euskera e inglés. En la aplicación se accede a un mapa para consultar las observaciones compartidas y a recursos informativos. Los usuarios registrados pueden subir observaciones mediante un breve formulario. En este formulario se incluyen cuestiones relacionadas con las observaciones, su relación con el cambio climático y con la aceptabilidad de las medidas de adaptación (Figura 9.7).

Los proyectos de ciencia ciudadana y los procesos participativos pueden constituir una excelente estrategia de adaptación al cambio climático y las inundaciones. Permiten conocer, aprender, co-crear y participar en la toma de decisiones,



Figura 9.6. Esquema de los contenidos en la web FLOODUP.

(Fuente: www.floodup.ub.edu.)

Box 9.5: Talleres FLOODUP.

Se han realizado talleres participativos en la comarca del Ripollés para conocer la percepción del riesgo de inundaciones, recopilar información histórica y evaluar los principales obstáculos y motivaciones para implementar medidas de adaptación. También se preparó un cuestionario online y se utilizó la aplicación para móviles Floodup. A lo largo de los talleres han participado unas 21 personas, representantes de actores relevantes en el territorio como representantes ayuntamientos, técnicos de centrales hidroeléctricas, del sector de gestión de las emergencias, del turismo, del sector educativo, expertos e investigadores. A través del taller hemos podido identificar más de 20 puntos vulnerables o de malas prácticas en caso de inundaciones en la comarca. También se identificaron factores que pueden incrementar el riesgo de inundaciones como aspectos relacionados con la ocupación de zonas inundables o intervenciones en zonas naturales como podrían ser los bosques de ribera.

A partir de los talleres se han podido discriminar elementos e impactos que causan más perturbaciones y molestias cuando se produce inundaciones, como los daños en puentes y vías de comunicación. Se han podido recopilar a través de los talleres más de 40 imágenes y varios documentos sobre inundaciones históricas. La mayoría se trata de episodios históricos que tuvieron consecuencias catastróficas (el 90%) y alguno reciente que provocó daños importantes, especialmente en las carreteras y zonas de cultivo.

Por otro lado, también se identificaron los principales retos y dificultades ante la implementación de medidas de adaptación como podría ser la falta o la dificultad de acceso a conocimiento experto por parte de las personas que han de tomar las decisiones y la resistencia a cambios en la fisonomía de los pueblos de alta montaña. Por último, se identificaron 20 medidas de adaptación y se analizaron para priorizarlas. Entre las medidas seleccionadas por los participantes como más importantes y adecuadas destacan aquellas relacionadas con la mejora del conocimiento y educación de la población (del territorio y visitante) en relación con los riesgos naturales.

favoreciendo una actitud más responsable y consciente.

Se han definido mecanismos para evaluar el impacto cualitativo y cuantitativo. Estos consisten en encuestas de satisfacción, entrevistas informales y análisis del impacto en las redes sociales.

También se han definido indicadores para realizar esta evaluación:

- Cuantitativos: número de participantes (más de 300), número de observaciones recibidas (más de 500), medidas de adaptación identificadas (más de 30), número de instituciones involucradas (más de 20), malas prácticas y puntos de riesgo identificados (más de 50).
- Cualitativos: medidas de adaptación recopiladas, necesidades e inquietudes identificadas, el nivel de satisfacción de los participantes, etc. Entre las medidas seleccionadas como más

importantes y adecuadas destacan aquellas relacionadas con la mejora del conocimiento y educación de la población (del territorio y visitante) en relación con los riesgos naturales. Como inquietudes identificadas cabe destacar las relacionadas con la ocupación de zonas inundables, intervenciones incorrectas en zonas naturales o la dificultad de acceso a conocimiento experto por parte de las personas que han de tomar las decisiones. Tras la participación en actividades del proyecto el nivel de satisfacción es elevado mostrándose disponibles e interesados para participar en actividades futuras.

En relación con los costes hay que considerar el coste de la/s persona/s a cargo de la dinamización de la participación (incluyendo las redes sociales), realización de actividades y organización y tratamiento de la información



Figura 9.7. Flujo de funcionamiento de la app FLOODUP.

(Fuente: www.floodup.ub.edu.)

recopilada y del coste del desarrollo (tanto funcional como de contenidos) y mantenimiento de la aplicación y de los servidores e

infraestructura informática asociada.

Los beneficios son numerosos, destacando:

- Aspectos sociales: incremento de la sensibilización de las personas involucradas, sentimientos positivos y de empoderamiento de las personas participantes, sensación de comunidad y autoestima por el entorno cercano, comprensión de las redes de personas intra e interterritoriales para hacer frente a los riesgos.
- Aspectos técnicos y científicos: el incremento de datos disponibles y la puesta a disposición de la ciudadanía de información sobre el riesgo de inundaciones, incremento de la visibilidad de la zona de los Pirineos, generación de una herramienta basada en la tecnología vinculada con la reducción de desastres.

Los factores de éxito de esta medida se basan en:

- Obtener datos y participaciones/ observaciones de calidad. Aunque la cantidad es importante el proyecto debe asegurar también la calidad. Por ello las observaciones siguen un proceso de validación.
- Identificar las fortalezas y debilidades para contribuir a sociedades mejor preparadas.
- Identificar inquietudes y necesidades de comunidades locales.
- Lograr la implicación de organizaciones locales.

Por otro lado, los factores limitantes son los siguientes:

- Las tecnologías pueden ser un limitante en cuanto a dificultades de acceso para algunos usuarios (gente mayor...). Se contemplan mecanismos para disminuirlas. Una baja participación en una zona resultaría en una zona con menos información. Se prevé que con el tiempo se vaya implantando y se incremente la participación.

- Como en muchas otras medidas el mayor reto es el mantenimiento futuro. El caso presente se plantea con una perspectiva de largo plazo, tal como demuestra el recorrido que se ha producido hasta el momento.
- Complejidad con relación al desarrollo y mantenimiento de la aplicación. Necesidad de validar y gestionar las observaciones.

En cuanto a la sinergia con estrategias y planes existentes se destacan las sinergias más relevantes del caso que aquí se presenta con el PNACC y la Estrategia europea considerando sus vertientes educativas, de ciencia ciudadana y como espacio de intercambio de conocimientos:

Sinergias con el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2021-2030:

- Línea de acción 8.4. Comunicación, divulgación y participación ciudadana en el ámbito urbano.
- Línea de acción 9.2. Identificación y transferencia del conocimiento vernáculo útil para la adaptación al cambio del clima
- Línea de acción 15.4. Refuerzo de los sistemas de autoprotección ante desastres climáticos en comunidades de riesgo.
- Línea de acción 17.2. Promoción de la educación para la sostenibilidad en el sistema educativo formal ante los desafíos del cambio climático
- Línea de acción 17.4. Comunidades de adaptación
- Línea de acción 17.5. Promoción de estilos de vida resilientes y adaptados al clima

Sinergias con la nueva estrategia de adaptación al cambio climático de la UE (febrero 2021)

“Fomentará una resiliencia local, individual y justa (Coalición de Educación por el Clima)... y Empoderará a los ciudadanos, que desempeñan un papel clave en el éxito de la estrategia de adaptación (Pacto Europeo por el Clima)”.

9.5 Análisis del desarrollo y aplicación de medidas de adaptación frente a sequías en Cataluña

Las lecciones extraídas de episodios de extremos hídricos tales como sequías y su aplicación en medidas de adaptación disminuyen considerablemente la vulnerabilidad ante los extremos.

Se presenta aquí una comparativa entre dos episodios de sequía que afectaron a Cataluña, con el objetivo de analizar el impacto de las medidas de adaptación desarrolladas tras el primer episodio. Este análisis forma parte de los sesenta casos de episodios de inundaciones y sequías en todo el mundo que se han comparado en el artículo de Kreibich et al. (2022).

9.5.1 Introducción a los episodios de sequía de 1986-1989 y 2004-2008

Los dos episodios meteorológicos de sequía analizados aquí afectaron a Cataluña, y se extendieron a gran parte del norte de la Península Ibérica (Figura 9.8). El déficit de precipitaciones se combinó durante los meses de verano con algunas olas de calor que incrementaron la evapotranspiración potencial. En particular, afectaron al sistema Ter-Llobregat constituido por el río Llobregat y el río Ter, y el río Segre, que se alimentan esencialmente de las precipitaciones que caen en la montaña de los Pirineos. Los embalses existentes en estos ríos son clave en la distribución de los recursos hídricos en Cataluña, por las siguientes razones: 1) abastecen de agua a un gran número de ciudades, entre ellas Barcelona y Girona, donde se concentra la mayor parte de la población; 2) proporcionan agua de riego para la agricultura; 3) proporcionan energía hidroeléctrica; 4) se utilizan como sistema de prevención de inundaciones; 5) deben mantener descargas ecológicas. Es por tanto un ejemplo de embalses polivalentes (control de inundaciones, hidroeléctricas, vertidos ecológicos, abastecimiento de agua, riego).

9.5.2 El episodio de sequía de 1986-1989

Este período de cuatro años se caracterizó por largas sequías (hasta cuatro meses sin precipitaciones), con olas de calor. A partir de SAFRAN se ha podido analizar la evolución de los índices SPI-12 y SSMI2.1, que dan una buena perspectiva de la sequía meteorológica e hidrológica. Aunque en 1986 no se registró ninguna ola de calor, los meses de julio y agosto registraron fuertes anomalías negativas de SPI-12 y SSMI2.1 (inferior a -3) en la mayor parte de la Península Ibérica. Hubo numerosos incendios forestales que fueron especialmente dañinos en Cataluña. En agosto y septiembre de 1987 se registraron en España dos olas de calor de 6 días que afectaron, respectivamente, a 13 y 27 provincias.

Sin embargo, los meses más secos en la mayor parte de España fueron mayo y junio de 1987, y sólo en el caso de Cataluña coincidió una ola de calor con valores negativos del SPI-12 en agosto. En octubre de 1987 una inundación catastrófica afectó a Cataluña y Valencia (zona este de España), con más de 400 mm y 700 mm en menos de 5 días, respectivamente. SPI y SSMI recuperaron valores positivos hasta septiembre de 1988 cuando SPI-3 fue <-3 en gran parte de la Península, principalmente en Cataluña donde

SSMI2-1 registró valores <-3. Una breve ola de calor se registró en España en septiembre de 1988 (23 provincias). A pesar de las fuertes lluvias producidas en noviembre de 1988 en Cataluña, el déficit de precipitaciones y la humedad del suelo no se recuperaron y los valores negativos de SPI-12 y SSMI2.1 dominaron en Cataluña hasta noviembre de 1989 (Figura 9.9). La situación se agravó a causa de dos olas de calor registradas en julio 1989, durando 6 días el primero y afectando a 36 provincias.

Como consecuencia de los dos años secos consecutivos 1988-1989, los embalses del Sistema Ter-Llobregat alcanzaron reservas mínimas absolutas, situación que resultó especialmente delicada porque la más afectada fue la franja del Ter, cuando suele ofrecer el mayor y más regular aporte. Esta sequía llevó a los embalses a niveles críticos, en general peores que en 2008, aunque climáticamente menos severa. Pero sus efectos fueron más graves porque aún no existía el embalse de la Llosa del Cavall y, sobre todo, porque la menor percepción de los riesgos de desastre permitió una alta prioridad a las descargas hidroeléctricas, lo que hoy sería impensable. Estuvieron a punto de hacer restricciones en el servicio de agua en Barcelona, lo que significa que se alcanzó el nivel máximo de alerta, aunque en ese momento todavía no había un plan de gestión de la sequía.

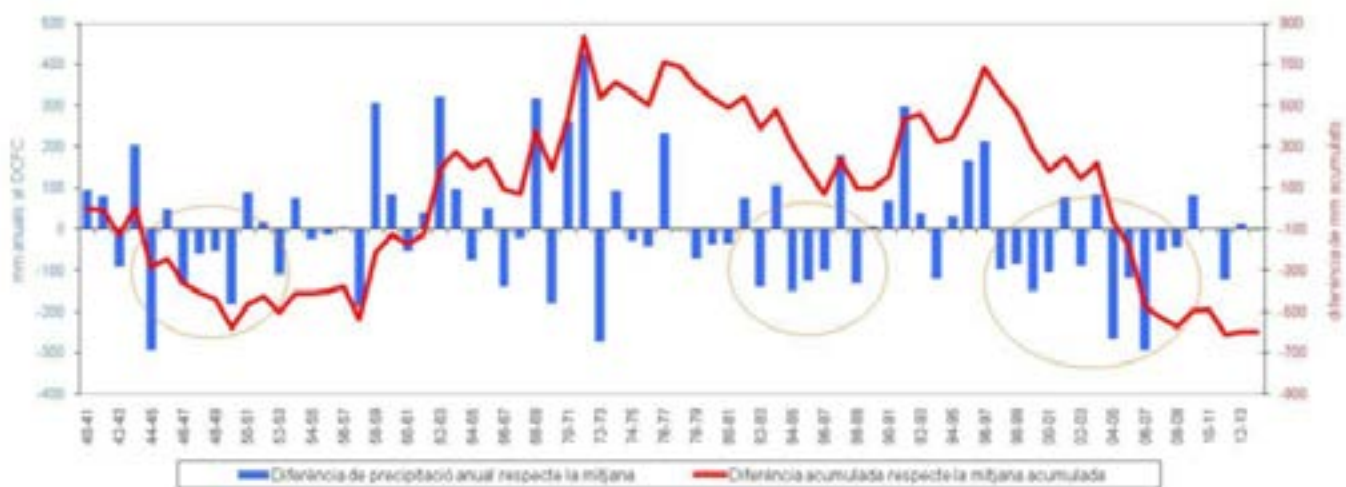


Figura 9.8. Evolución de las anomalías de la precipitación media anual en el Distrito de Cuenca Fluvial de Cataluña (DCFC) desde el año hidrológico 1940-1941 (de septiembre a octubre) hasta el año hidrológico 2013-2014.

(Fuente: Agència Catalana de l'Aigua.)

Finalmente, a la ciudad de Barcelona finalmente no se le aplicaron restricciones porque hubo lluvias generalizadas en toda la región en octubre de 1990.

Entre 1986 y 1989 se produjo una serie de sequías casi consecutivas que llevaron a grandes pérdidas a consecuencia de la falta de planificación. Sin embargo, constituyeron el punto de partida de la creación de medidas de adaptación a las sequías.

Los impactos más importantes en 1989 debido a la sequía fueron pérdidas severas en la agricultura, principalmente en cultivos de cereales, falta de agua potable, pérdidas económicas en estaciones de esquí por falta de nieve (pérdidas de más de 5.000 millones de ptas. -67.193.153,3 € 2019- en el sector del turismo de invierno), y pérdidas en la producción hidráulica.

La sequía afectó también al resto de España, donde las pérdidas en el sector hidroeléctrico por la sequía entre octubre de 1988 y enero de 1989 fueron de 35.000 millones de ptas. (503.948.649 € 2019) y se perdió entre un 20 y un 25% de la producción de cereales. Como consecuencia de la escasez de agua y del aumento del consumo de electricidad, se produjo un aumento de las importaciones de petróleo y carbón. Además de los impactos hidrológicos, hubo más de 350 incendios forestales y 45000 ha quemadas en

Cataluña en 1986, siendo el más grave el caso producido en la Montaña de Montserrat, donde murieron varias personas y se destruyó más del 41% del Parque Natural protegido. Los incendios forestales de invierno también se produjeron en Cataluña en 1986, hecho que no es habitual. La experiencia de esos momentos críticos permitió aprender muchas lecciones que han sido aplicadas en medidas de adaptación frente las sequías y prevención de incendios forestales de los años siguientes.

9.5.3 El episodio de sequía de 2004-2008

Tras la ola de calor que afectó a Europa en 2003, se registró un periodo de lluvias en el Levante de España hasta junio de 2004. En junio y julio de 2004 se registraron dos olas de calor cortas de tres días cada una. En algunas zonas de esta región se registraron valores negativos de SPI-1 y SPI-3 en agosto de 2004 y este déficit de precipitaciones se prolongó hasta agosto de 2005 (el déficit afectó a toda la Península Ibérica durante 2005). En primavera y verano de 2005, la sequía afectó a la mayor parte de la Península Ibérica, registrándose valores de SPI-12 y SSMI2.1 < -2 hasta octubre de 2005 en Cataluña, donde dos inundaciones afectaron a esta región en octubre y noviembre de 2005 (Figura 9.10).

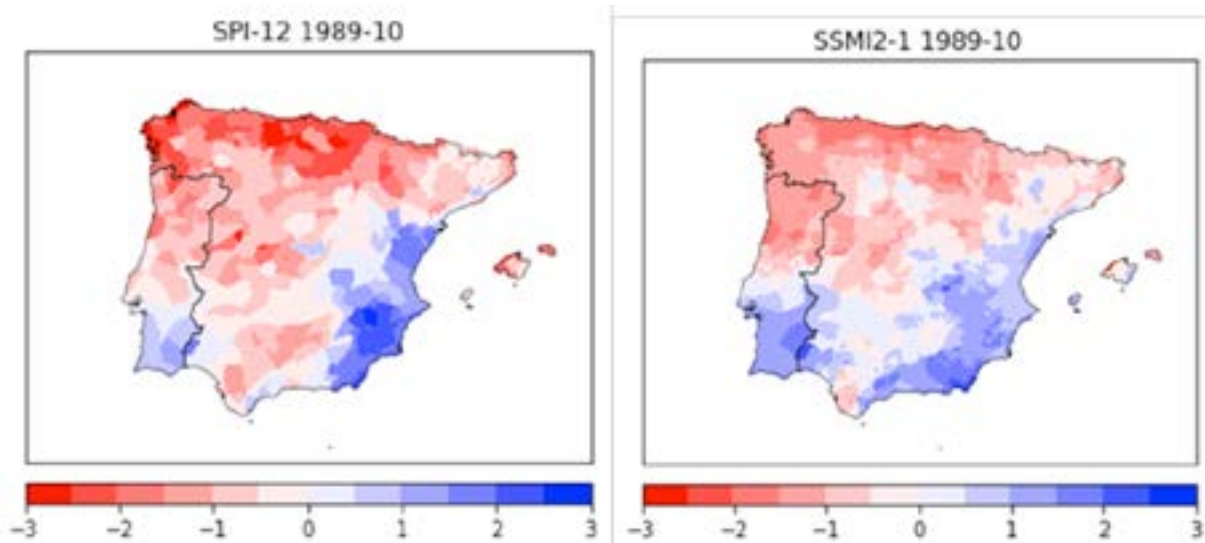


Figura 9.9. SPI-12 y SSMI2-1 en octubre de 1989 en España y Portugal (izquierda: reanálisis de SAFRAN; derecha: SURFEX LSM forzado por SAFRAN).

(Fuente: elaboración propia.)

Sin embargo, los valores negativos del SPI-12 se prolongaron hasta el verano de 2006 en el Levante de España. Dos olas de calor de 4 días cada una se registraron en algunas regiones de España en julio y agosto de 2005 y dos más de tres días en julio y septiembre de 2006. Un evento meteorológico consecutivo de sequía comenzó en Cataluña en abril de 2006 y duró hasta agosto de 2006 y comenzó de nuevo en noviembre de 2006 y duró hasta abril de 2007, si consideramos los valores de SPI-3.

Pero si consideramos el SPI-12 podría considerarse como el mismo evento de sequía en los Pirineos, donde nace la mayor parte de sus ríos. Tras una primavera lluviosa, se registraron valores negativos de SPI-3 en el Noreste de España desde julio de 2007 hasta mayo de 2008 y valores negativos de SSMI2.1 corroboraron un suelo seco en toda la Península Ibérica, excepto en la Comunidad Valenciana (Este de España). En julio de 2007 se registró una ola de calor corta (4 días).

Entre 2004 y 2009 se produjo una sucesión de episodios de sequía que llevaron a Cataluña a una situación crítica. En muchas esferas se vinculó la intensidad y extensión de ese período de sequía con la acción del cambio climático.

La sequía provocó pérdidas económicas muy importantes en el sector primario. En las

actividades agrícolas, la sequía afectó tanto a los cultivos de secano como a los de regadío. En los primeros por la ausencia de precipitaciones y, en los segundos, por la falta de agua en los embalses. Los cereales de las comarcas leridanas fueron los primeros cultivos dañados, con pérdidas, en algunos casos, del 100% de la cosecha. Los cultivos de frutos secos, el olivo y la vid se vieron afectados por la insuficiencia de las lluvias, tanto en las comarcas de Tarragona como en Lleida.

La red de canales de riego en las regiones occidentales adoptó diferentes estrategias para dosificar el suministro de agua. Por ejemplo, la Comunidad de Regants del Canal d'Urgell cerró en primavera el canal durante unos días para prolongar la temporada de riego. Sin embargo, la adopción de todas estas medidas extremas hizo que la producción de cultivos de regadío disminuyera significativamente. La falta de agua para la cría del ganado en las comarcas del Prepirineo y Lleida motivó el transporte de agua en camiones cisterna. Este hecho empujó en gran medida los costes de explotación del ganado. Los sectores más perjudicados fueron el ovino y el caprino. En la zona pirenaica, la trashumancia estival se tenía que hacer por el Val d'Aran, la comarca menos afectada por la sequía.

En el resto de los Pirineos, los pastos estaban muy secos. El déficit de precipitaciones también afectó a los bosques y se tradujo, por un lado,

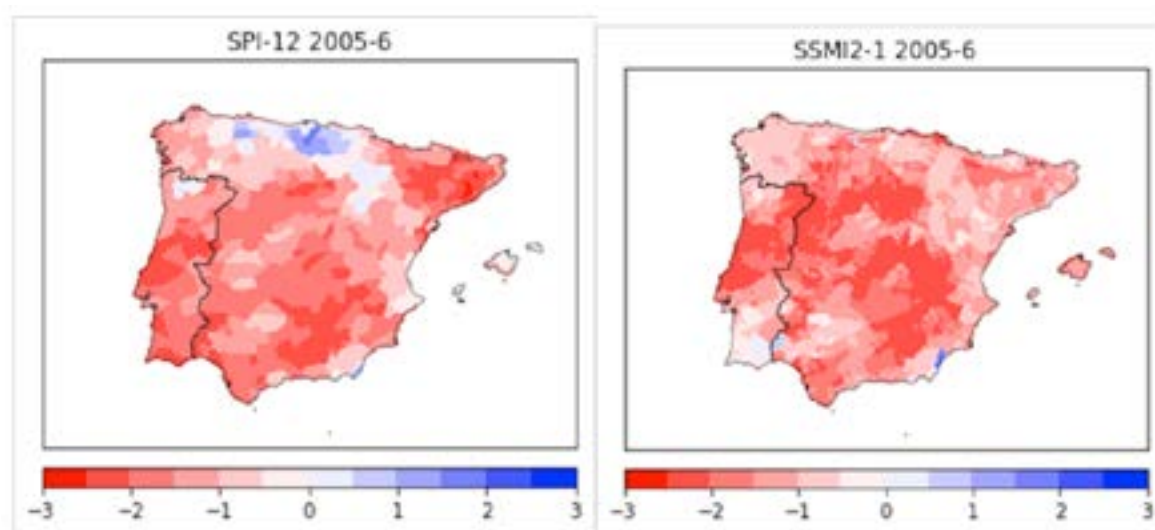


Figura 9.10. SPI-12 y SSMI2-1 en junio de 2005 en España y Portugal (izquierda: reanálisis de SAFRAN; derecha: SURFEX LSM forzado por SAFRAN)

(Fuente: elaboración propia.)

en un alto riesgo de incendios y, por otro, en la desecación de muchos árboles por estrés hídrico, y la reducción de la producción forestal.

A medida que avanzaba el año 2005, las reservas de agua de los embalses y acuíferos disminuyeron paulatinamente. En el mes de mayo más de setenta núcleos de población de veintidós municipios de las comarcas de Lleida tenían restricciones en el suministro de agua. Paradójicamente, las comarcas más afectadas fueron la Alta Ribagorça, el Pallars Jussà y el Alt Urgell (Prepirineo), es decir, demarcaciones donde las precipitaciones suelen ser elevadas.

En la primera semana de junio, la sequía ya afectaba al 95% de los municipios de Cataluña. En el verano las reservas continuaron disminuyendo. Los embalses de las cuencas del Ter y del Llobregat, que abastecen de agua a las comarcas de Barcelona y Girona, estaban por debajo del 45% de su capacidad. Si en junio de 2004 el agua almacenada en las presas del Llobregat-Ter rondaba los 600 hm³, en junio de 2005 era inferior a los 290 hm³ llegando a un mínimo en octubre de 2005 de menos de 200 hm³, en el nivel de alerta que duró hasta diciembre de 2005. El volumen total de embalse del sistema Llobregat-Ter nunca volvió a los valores iniciales de 2003, a pesar de algunos episodios de lluvias intensas.

Las lluvias de otoño aliviaron la sequía. El regreso de las lluvias en otoño de 2005 (principalmente en la costa) evitó restringir el suministro para uso doméstico en más de la mitad de la población de Cataluña, pero en noviembre todavía había sesenta poblaciones con restricciones. Los embalses, a finales de noviembre, se encontraban al 47% de su capacidad.

En agosto de 2007 se volvió a alcanzar el nivel de alerta y se mantuvo hasta junio de 2008, llegando en abril de 2008 al nivel de emergencia con menos de 150 hm³ almacenados en las presas del sistema Llobregat-Ter que amenazaba gravemente el suministro de agua potable en Barcelona y Gerona. El 1 de abril de 2008, el agua total almacenada en Cataluña era de 125 hm³ (cerca del 20% de la capacidad máxima). Unas fuertes lluvias en mayo de 2008 finalizaron la situación de sequía.

9.5.4 Descripciones de las medidas de adaptación desarrolladas entre ambos eventos

No hubo campañas de concienciación sobre la escasez de agua durante el evento de 1986-1989. Se desarrolló una importante campaña de sensibilización durante el evento 2004-2008 que condujo a una reducción en el consumo muy importante en el Área Metropolitana de Barcelona.

Tras la sequía de 1986-1989 se construyeron los embalses de La Llosa del Cavall (79,4 hm³), Rialb (402,8 hm³) y la Palma d'Ebre (1 hm³) para el suministro de agua potable y agua de riego, así como la construcción del minitrasvase del río Ebro a Tarragona. Esto ayudó a la gestión de la sequía 2004-2008. Con motivo de la sequía de 2004-2005 se construyó una planta desaladora en Barcelona y se recuperaron 200 pozos de agua (principalmente urbanos) para aprovechar sus aguas subterráneas para abastecer las necesidades del Sistema. En 2003-2004 el agua urbana suministrada por los pozos de agua fue de 35 hm³/año y esta cantidad aumentó en 2007-2008 a 65 hm³/año.

La prevención y extinción de incendios forestales mejoró mucho tras los incendios forestales que afectaron a Cataluña en 1986, 1994 y 2003, con la elaboración de la planificación INFOCAT. En consecuencia, no se produjeron grandes incendios forestales a causa de la sequía y las olas de calor que afectaron a Cataluña entre 2004 y 2008, a pesar del aumento de la masa forestal (Turco et al, 2013).

Es importante tener en cuenta que los agricultores suelen reunirse en abril con la Comisión que decide el suministro de agua de los embalses para la campaña de riego, con el fin de decidir los cultivos que se deben sembrar ese año en función de las probabilidades del volumen de agua disponible. Si en este momento las reservas están por encima de los 367 hm³ es muy probable que la campaña se desarrolle con normalidad. Los pronósticos se basan en valores climáticos. No se aplicó pronóstico estacional en ninguno

de los eventos de sequía analizados aquí. Sin embargo, en la sequía de 2004-2008 se aplicó un modelo de pronóstico basado en más de 60 años de aportes a los embalses del sistema. El pronóstico proporcionó el nivel de alerta para diferentes escenarios de recursos hídricos en cada cuenca. Actualmente ya se están incorporando las predicciones estacionales en la toma de decisiones.

Las medidas de adaptación frente a la sequía desarrolladas en Cataluña tras el episodio que finalizó en 1989 disminuyeron considerablemente la vulnerabilidad a pesar del aumento de exposición, llevando a unos daños menores de los registrados en las sequías de 1986-1989 pese a su mayor peligrosidad.

Durante el primer episodio analizado (1986-1989) no existía ningún procedimiento oficial para hacer frente a las sequías. El agua almacenada en el sistema Ter-Llobregat llegó al umbral crítico del 20% (menos de 100 hm³ frente a un almacenamiento máximo de 500 hm³), por lo que casi se aplicaron restricciones en la ciudad de Barcelona, pero no se publicó ningún decreto oficial de sequía. Las restricciones de agua solo se aplicaron a la agricultura y los pueblos pequeños. Incluso la producción hidroeléctrica primó frente a los restantes usos del agua. El primer Decreto Oficial de Sequía aplicado en Cataluña fue en 1999, cuando el agua almacenada en el Sistema rondaba los 200 hm³. En el episodio 2004-2008, el Decreto de Sequía fue promulgado dos veces por la Generalitat de Catalunya. La primera vez fue en mayo de 2005 (93/2005 de 17 de mayo) a propuesta de la ACA (Agencia Catalana del Agua). El decreto pretendía adoptar de inmediato medidas para ahorrar y hacer un uso más eficiente del agua almacenada a fin de atender el déficit pluviométrico en todos los municipios, por la restricción del suministro de agua en usos agrícolas e industriales, incluida la hidroeléctrica. El decreto preveía diferentes niveles de emergencia y priorizaba el abastecimiento domiciliario de agua, uso prioritario según la legislación. El decreto obligaba a las empresas de agua ya todos los municipios a presentar medidas de ahorro de agua y aplicarlas, lo cual no se cumplió al 100%. Se modificó el decreto de

sequía (Decreto 187/2005, de 6 de septiembre) para indexar aún más las reservas y así garantizar el agua para uso doméstico hasta la primavera de 2006. El decreto estuvo vigente hasta finales de 2005, aunque fue derogado a finales de noviembre gracias a las precipitaciones y a la mejora del nivel en los embalses. La ACA aplicó muchas medidas para cumplir con el decreto de sequía. Entre otras cosas, ordenaron el trasvase de agua del embalse de Sau a Susqueda para aprovechar al máximo los recursos, sancionaron a diferentes empresas hidroeléctricas que hicieron un uso intensivo del agua provocando la desecación de algunos tramos de los principales ríos y una alta mortandad de peces, y propusieron a las empresas de suministros de agua a hacer un mejor uso de las aguas subterráneas.

En marzo de 2007 el agua almacenada en embalses en Cataluña era inferior al 42% y se aprobó un nuevo Decreto de Sequía (84/2007, de 3 de abril de 2007).

Estuvo operativo hasta el 13 de enero de 2009. Se constituyó en la ACA el Comité Permanente de Sequía, como órgano ejecutivo para el seguimiento de episodios de carencia de recursos y planificación de actuaciones, y la Comisión de Gestión de Sequía (CGS) que se encargó la doble labor de redacción del nuevo decreto de medidas excepcionales y de emergencia para la gestión del probable episodio de sequía de este año, así como la redacción y tramitación del Plan de Gestión de la Sequía. Siguiendo el decreto 84/2007, de 3 de abril, los escenarios de alerta que se promulgaron dentro de este plan son los siguientes:

- Escenario de prealerta: intensificar el seguimiento del estado de las reservas y acciones de información y sensibilización, encaminadas a favorecer el ahorro de agua
- Escenario de excepcionalidad o alerta de nivel 1: situación en la que, dada la excepcional escasez de recursos hídricos, es necesario adoptar las medidas de ahorro de agua en relación con los usos y el medio ambiente previstas en este Decreto para garantizar el suministro en el mediano plazo. Cuando el nivel 1

dura algunos meses o las condiciones secas son muy intensas se pasa al nivel 2.

- Escenario de excepcionalidad de nivel 2: situación en la que, dada la intensificación del estado de escasez excepcional de los recursos hídricos, es necesario adoptar las medidas restrictivas en relación con los usos y el medio ambiente previstas en este Decreto para garantizar el suministro a corto plazo.
- Escenario de emergencia: situación en la que, dada la escasez excepcional de recursos hídricos, es necesario establecer restricciones y limitaciones extraordinarias en los usos del agua para garantizar su suministro.

El nivel de alerta y excepcionalidad se define en función del agua almacenada en los embalses, por lo que los umbrales varían según las cuencas y el mes del año. En el caso del Sistema Ter-Llobregat los umbrales serían: a) nivel 1: 205-225 hm³ (cerca del 35%); b) nivel 2: 145 hm³ (25%); c) emergencia: 122 hm³ (20%).

9.6

Conclusiones y recomendaciones

En este caso de estudio se ha trabajado a escala de todo el macizo pirenaico. El impacto de los eventos extremos en el Pirineo en el contexto del cambio climático es creciente. Es por ello necesario diseñar estrategias de adaptación lo más eficaces y holísticas posibles. La ciencia ciudadana y la sensibilización que se puede llevar a cabo a través del proyecto, dan respuesta a este reto. La participación activa de los usuarios potencia la involucración de la ciudadanía en su propia adaptación. En esta medida la ciencia ciudadana no se utiliza solo como un canal para obtener datos o información sino también para la transformación social.

Otro de los retos actuales es disponer de la máxima cantidad de información posible más allá de las tradicionales fuentes de información como la prensa o informes oficiales (Llasat-Botija et al., 2018). En el caso de los Pirineos la disponibilidad de información sobre los impactos de eventos extremos puede ser difícil dado su escaso impacto en numerosas ocasiones en los periódicos y medios de comunicación, de ahí la importancia de una iniciativa así. Además, estas contribuciones son y serán positivas para realizar investigaciones científicas en este territorio. El participante debe contestar unas breves preguntas sobre el evento observado o la práctica (buena o mala) recogida, como “¿Te parece relacionado con el cambio climático?”, o “¿Te parece adecuada esta medida?”. Con esto se pretende que el proceso de subir una observación vaya más allá de un acto mecánico para convertirse en un proceso de reflexión crítica.

Finalmente, se han observado barreras que dificultan la implantación de medidas de adaptación. Algunas están relacionadas con la percepción y aceptación por parte de la población. Es por ello por lo que trabajar con la comunidad es una oportunidad para identificar sus necesidades e inquietudes e involucrarla en los procesos de adaptación.

La educación y sensibilización ciudadana constituyen una potente estrategia de adaptación. El desarrollo y aplicación del proyecto contribuye a la mejora del conocimiento de la población sobre los riesgos naturales en general. En el seno del proyecto, a través de la realización de talleres y desarrollo de materiales, se genera un espacio

de intercambio de conocimientos y de diálogo al entorno de los riesgos naturales que conlleva una mejora del conocimiento de todos los participantes independientemente de su rol en el mismo (investigador, colaborador,...). Un ejemplo sería el mapa que se genera con las observaciones enviadas, que hace visible el impacto del cambio climático y los riesgos hidrometeorológicos en el territorio. La recuperación de la memoria histórica y la mejora de la cultura comunitaria del riesgo es uno de los resultados de estos proyectos. FLOODUP quiere también poner en valor los aspectos positivos de las inundaciones, como un fenómeno que forma parte de nuestro entorno y cultura, y por tanto, fomentar una actitud responsable y positiva para convivir con ellas.

La educación (y la ciencia ciudadana) consiste en una medida no estructural de adaptación ya que promueve una población informada. Y una población informada tiene mayor capacidad para la convivencia con los riesgos naturales y la toma de decisiones.

Bibliografia

ACA, Agencia Catalana de l'Aigua. (2006). Protocol d'avaluació de la qualitat biològica dels rius (BIORI). <https://studylib.es/doc/4588027/protocol-d-avaluació-de-la-qualitat-biològica-dels-rius>.

Adamovic, M., Després, J. (2020). Seasonal impacts of climate change on electricity production. JRC Technical Report, JRC PESETA IV Project. <https://doi.org/10.2760/879978>.

AEAG, Agence de l'Eau Adour Garonne. (2014). Garonne 2050 - Etude prospective sur les besoins et les ressources en eau, à l'échelle du bassin de la Garonne. Rapport final, 68 pages. https://www.garonne-amont.fr/wp-content/uploads/2019/03/2014_AEAG_Synthèse-Garonne2050-1.pdf.

AEMET, Agencia Estatal de Meteorología. (2017). Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR5. Madrid, Spain. 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).

Alcázar Montero, J. (2007). El método del Caudal Básico para la determinación de Caudales Mantenimiento Aplicada al Ebro. Tesis Doctoral, Universitat de Lleida.

Alfieri, L., L. Feyen, G. Baldassarre, 2016, Increasing flood risk under climate change: a pan-European assessment of the benefits of four adaptation strategies, *Climatic Change*, 136, 507-521.

Amblar-Francés, M. P., Ramos-Calzado, P., Sanchis-Lladó, J., Hernanz-Lázaro, A., Peral-García, M. C., Navascués, B., Dominguez-Alonso, M., Pastor-Saavedra, M. A., and Rodríguez-Camino, E. (2020) High resolution climate change projections for the Pyrenees region, *Adv. Sci. Res.*, 17, 191–208, <https://doi.org/10.5194/asr-17-191-2020>.

Antigüedad, I., Meaurio, M., Valiente, M., Uriarte, J., Zabaleta, A., 2022. Adaptación al cambio climático desde la gestión de la funcionalidad hidrológica del territorio: el caso de la cuenca del río Bidasoa. En (Beguería et al., 2022) *Adaptación al cambio climático en la gestión de los recursos hídricos de los Pirineos*. Memorias científicas del proyecto PIRAGUA, vol. 2. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Zaragoza, España, xx-xx. <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14684>.

Antigüedad, I., Zabaleta, A., Meaurio, M., Valient, M., & Uriarte, J. (2021). Adaptación al cambio climático desde la gestión de la funcionalidad hidrológica del territorio.

Arnett, J. L. (1976). Methodologies for the determination of stream resource flow requirements: an assessment.

Asbjornsen, H., Goldsmith, G., Alvarado-Barrientos, M., Rebel, K., Van Osch, F., Rietkerk, M., Chen, J., Gotsch, S., Tobón, C., Geissert, D., Gómez-Tagle, A., Vache, K., Dawson, T. (2011). Ecohydrological advances and applications in plant-water relations research: a review. *Journal of Plant Ecology* 4 (1/2), 3-22, <https://doi.org/10.1093/jpe/rtr005>.

Auverlot, D., Follenfant, P. Joly, A. and Le Coz C. (2021) Conditions de mobilisation des retenues hydroélectriques pour le soutien d'étiage dans le bassin Adour-Garonne. Rapport CGEDD n°013099-01, CGAAER n°19109, 136 pages.

Beguería et al. (2003).

Beguería S., Caballero Y., Le Cointe P, Palazón L., 2022b. Los recursos hídricos de los Pirineos y su importancia regional. 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. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Saragosse, Espagne, xx-xx. <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14683>.

Beguería S., et al., (2022a). Caracterización de los recursos hídricos de los Pirineos en la actualidad, y escenarios futuros. Memorias científicas del proyecto PIRAGUA, vol. 1. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD- CSIC), Zaragoza, España. <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14683>.

Beguería, S., 2022. Introducción: retos y oportunidades para la adaptación al cambio climático en los recursos hídricos de los Pirineos. En (Beguería et al., 2022) Adaptación al cambio climático en la gestión de los recursos hídricos de los Pirineos. Memorias científicas del proyecto PIRAGUA, vol. 2. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Zaragoza, España, xx-xx. <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14684>.

Beguería, S., Haro Monteagudo, D., & Palazón, L. (2021). Adaptación al cambio climático en agricultura de regadío: Ayuda a la toma de decisiones con una estrategia de dos direcciones.

Beguería, S., Haro-Monteagudo, D., Palazón, L., 2022. Adaptación al cambio climático en la agricultura de regadío: el caso de Riegos del Alto Aragón. En (Beguería et al., 2022) Adaptación al cambio climático en la gestión de los recursos hídricos de los Pirineos. Memorias científicas del proyecto PIRAGUA, vol. 2. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Zaragoza, España, xx-xx. <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14684>.

Bellot, J., Chirino, E., Bellot, P., Sánchez, J.R. (2004). Importància del bosc de Poblet en la regulació del cicle hídric i la qualitat de l'aigua. En: Actes de les jornades el Bosc de Poblet: del règim senyorial a la gestió pública. Generalitat de Catalunya. ISBN 84-393-6616-7

Benito Alonso, J.L. 2006. Vegetación del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. Serie Investigación 50. Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón, Zaragoza

Berga, L. (2016) The role of hydropower in climate change mitigation and adaptation: A review. *Engineering*, 2, 313–31

Bertoni, F., Castelletti, A., Giuliani, M. and Reed, P. M. (2019) Discovering dependencies, trade-offs, and robustness in joint dam design and operation: An ex-post assessment of the Kariba dam. *Earth's Future*, 7, 1367–1390.

Birsan, M. V., Molnar, P., Burlando, P., & Pfaundler, M. (2005). Streamflow trends in Switzerland. *Journal of Hydrology*, 314(1–4), 312–329. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.008>

BOPA. (2005). Reglament de protecció dels hàbitats aquàtics (pp. 792–800).

BOPA. (2018). Llei 21/2018, del 13 de setembre, d'impuls de la transició energètica i del canvi climàtic (Litecc) (pp. 1–33).

Bosch, J.M., Hewlett, J.D. (1982). A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *J. Hydrol.* 55, 3–23, doi: 10.1016/0022-1694(82)90117-2

Brauman, K.A., Daily, G.C., Duarte, T.K., Mooney, H.A. (2007). The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 32, 6.1-6.32, doi: 10.1146/annurev.energy.32.031306.102758

BRGM. (2019). Incertitude et robustesse des politiques de l'eau. Rapport Final.

Brunner, M. I., Björnson Gurung, A., Zappa, M., Zekollari, H., Farinotti, D., & Stähli, M. (2019). Present and future water scarcity in Switzerland: Potential for alleviation through reservoirs and lakes. *Science of the Total Environment*, 666, 1033–1047. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.169>

Burkhard B., Guerra C.A., Davíðsdóttir B. (2019). Discussion paper 3: Soil retention (regulating) ecosystem services. Expert Meeting on Advancing the Measurement of Ecosystem Services for Ecosystem Accounting, New York. Available at: <https://seea.un.org/events/expert-meeting-advancing-measurement-ecosystem-services-ecosystem-accounting>

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>.

Cakir, R., 2020. Les fonctions écologiques de régulation des nitrates au sein des bassins versants : des cours d'eau aux territoires. Université Paul Sabatier - Toulouse III, Toulouse.

Cakir, R., Le Roux, G., Sánchez Pérez, J.M., 2022. Transformation du territoire et dynamique hydrologique dans les têtes de bassin versant : le cas de la tourbière de Bernadouze. En (Beguería et al., 2022) Adaptación al cambio climático en la gestión de los recursos hídricos de los Pirineos. Memorias científicas del proyecto PIRAGUA, vol. 2. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Zaragoza, España, xx-xx. <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14684>.

Calder I.R. (2007). Forests and water - Ensuring forest benefits outweigh water costs. *Forest Ecology and Management*, 251, 110-120, doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.015

Candela, L., Tamoh, K., Olivares, G., Gomez, M. (2012). Modelling impacts of climate change on water resources in ungauged and data-scarce watersheds. Application to the Siurana catchment (NE Spain). *Science of the Total Environment* 440, 253–260. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.062>.

CEDEX (2017) Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España. Centro de Estudios Hidrográficos, Madrid, Spain. http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/3B08CCC1-C252-4AC0-BAF7-1BC27266534B/145732/2017_07_424150001_Evaluaci%C3%B3n_cambio_clim%C3%A1tico_recu.pdf (último acceso: mayo de 2021).

CHE (2016) Plan hidrológico de la parte Española del la Demarcación Hidrográfica del Ebro 2015-2021. Confederación Hidrográfica del Ebro, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio ambiente, Gobierno de España.

- CHE (2018). Plan Especial de actuación en situación de alerta o eventual sequía. <http://www.chebro.es/contenido.visualizar.do?idContenido=53999&idMenu=5560> (último acceso: junio de 2021).
- CHE (2021). Propuesta de Proyecto de Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Ebro Revisión de tercer ciclo (2021-2027). <https://www.chebro.es/plan-hidrologico-del-ebro-2015-2021>.
- CHE, 1998. Catalogación de los acuíferos de la Cuenca del Ebro. Oficina de Planificación Hidrológica. Confederación Hidrográfica del Ebro, Zaragoza.
- Clarimont, S., Scott, D., McBoyle, G., Walter, S., & Moore, J. (2001). Turismo de invierno y cambio climático: La producción de nieve artificial en los Pirineos, ¿un uso sostenible del agua? *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12(8), 1411–1431.
- Cognard, J., & François, H. (2019). Review of ski resort operating costs and market analysis (PROSNOW project).
- COM (2002), 179 final. Comunicación de la Comisión al Consejo, el Parlamento Europeo, el Comité Económico y Social y el Comité de las Regiones: Hacia una estrategia temática para la protección del suelo. <https://ec.europa.eu/transparency/documents-register/detail>.
- COM (2006) 232 final. Comisión de las Comunidades Europeas. Propuesta de Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo por la que se establece un marco para la protección del suelo. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52006PC0232>.
- Comité de Bassin Adour Garonne. (2021). Projet SDAGE 2022-2027.
- Commission Européenne. (2019). Rapport de la commission au parlement européen et au conseil sur la mise en œuvre de la directive-cadre sur l'eau (2000/60/CE) et de la directive « inondations» (2007/60/CE). Deuxièmes plans de gestion de district hydrographique. Premiers plans de gestion.
- Davasse, B., Briffaud, S., Carré, J., Henry, D., Rodriguez, J.-F., 2012. Sud-Ouest européen. *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest* 57–68.
- Debarbieux, B., Oiry, M., Rudaz, G., Maselli, D., Kohler, T., & Jurek, M. (2014). El Turismo en las Regiones de Montaña Esperanzas, Temores y Realidades. Serie sobre el desarrollo sostenible de las montañas. In *El Turismo en las Regiones de Montaña Esperanzas, Temores y Realidades*. https://www.eda.admin.ch/dam/deza/es/documents/themen/klimawandel/Tourism-in-Mountain-Regions_ES.pdf
- DGA (2018). Catálogo aragonés de buenas prácticas agrarias para un desarrollo bajo en carbono y un sector agrario más resiliente al cambio climático. <https://www.aragon.es/documents/20127/4964055/Cat%C3%A1logo+aragon%C3%A9s+de+buenas+pr%C3%A1cticas+agrarias.pdf/43d45403-abb2-ea19-f255-d96bae5ee4ab?t=1562926820774> (último acceso: mayo de 2021).
- Di Baldassarre, G., Wanders, N., AghaKouchak, A., Kuil, L., Rangelcroft, S., Veldkamp, T. I. E., Garcia, M., van Oel, P. R., Breinl, K. and Loon, A. F. V. (2018) Water shortages worsened by reservoir effects. *Nature Sustainability*, 1, 617–622.

Diaz, H. F., Eischeid, J. K., Duncan, C., & Bradley, R. S. (2003). Variability of Freezing Levels, Melting Season Indicators, and Snow Cover for Selected High-Elevation and Continental Regions in the Last 50 Years. *Climatic Change*, 59(1/2), 33–52. <https://doi.org/10.1023/A:1024460010140>.

Directiva 76/160/CEE, del Consejo de 8 de diciembre de 1975, relativa a la calidad de las aguas de baño. doi:10.1111/oik.03053

Domènech, M., Travasset, O., & Pons, M. (2021). La competencia por los recursos hídricos en Andorra.

Domènech, M., Travasset, O., Pons, M., 2022. La competencia por los recursos hídricos en la actualidad y su evolución futura: el caso del Principado de Andorra. En (Beguería et al., 2022) Adaptación al cambio climático en la gestión de los recursos hídricos de los Pirineos. Memorias científicas del proyecto PIRAGUA, vol. 2. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Zaragoza, España, xx-xx. <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14684>.

Donoso, I., C. Stefanescu, A. Martinez-Abraín and A. Traveset. 2016. Phenological asynchrony in plant-butterfly interactions associated with climate: a community-wide perspective. *Oikos*

Durán, J., & Salamanca, S. (2008). Impacto del cambio climático sobre la producción agrícola española: ETP y necesidades hídricas de los cultivos.

EDF, 2019. Aménagement hydroélectrique d'Auzat.

EEA, 2014, National adaptation policy processes in European countries, EEA Report No 4/2014.

EEA, 2015, National monitoring, reporting and evaluation of climate change adaptation in Europe, EEA Technical report No 20/2015.

EEA, 2015, Overview of climate change adaptation platforms in Europe, Technical report No 5/2015.

EEA, 2016, Flood risks and environmental vulnerability-Exploring the synergies between floodplain restoration, water policies and thematic policies. EEA Report No 1/2016.

EEA, 2016, Urban adaptation to climate change in Europe 2016. Transforming cities in a changing climate. EEA Report, No 12/2016.

Ellison, D., Futter, M.N., Bishops, K. (2012). On the forest cover–water yield debate: from demand- to supply-side thinking. *Global Change Biology* 18, 806–820, doi: 10.1111/j.1365-2486.2011.02589.x

Ellison, D., Morris, C.E., Locatelli, B., Sheil, D., Cohen, J., Murdiyarso, D., Gutierrez, V., van Noordwijk, M., Creed, I.F., Pokorny, J., Gaveau, D., Spracklen, D., Bargués-Tobella, A., Ilstedt, V., Teuling, A., Gebreyohannis, S., Sands, D., Muys, B., Verbist, B., Springgay, E., Sugandi, J., Sullivan, C.A. (2017). Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change* 43, 51–61, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002FAO (1998).

- Emmanouil, S., Nikolopoulos, E. I., François, B., Brown, C. and Anagnostou, E. N. (2021) Evaluating existing water supply reservoirs as small-scale pumped hydroelectric storage options – A case study in Connecticut. *Energy*, 226, 12035
- Escudero, A., R. García-Camacho, A. García-Fernández, R.G Gavilán, L. Giménez-Benavides, J.M., Iriondo, C. Lara-Romero, J. Morente, D.S. Pescador. 2012. Vulnerabilidad al cambio global en la alta montaña mediterránea. *Ecosistemas* 21(3):63-72. Doi.: 10.7818/ECOS.2012.21-3.08
- EU, 2014, Assessing the Implications of Climate Change Adaptation on Employment in the EU.
- EU, 2021, EU Strategy on Adaptation to climate change: https://ec.europa.eu/clima/policies/adaptation_en
- EUROPARC-España, 2018. Las áreas protegidas en el contexto del cambio global Incorporación de la adaptación al cambio climático en la planificación y gestión. Manual 13. 7-157
- European Communities. (2009). Common implementation strategy for the water framework directive (2000/60/EC).
- FAO (2015). Status of the World's Soil Resources. Chapter 2: The role of soils in ecosystem processes. ISBN 978-92-5-109004-6 (<http://www.fao.org/3/bc591e/bc591e.pdf>)
- Fletcher, S., Lickley, M. and Strzepek, K. (2019) Learning about climate change uncertainty enables flexible water infrastructure planning. *Nature Communications*, 10.
- Fohrer, N., Haverkamp, S., Frede, H.G. (2005). Assessment of the effects of land use patterns on hydrologic landscape functions: development of sustainable land use concepts for low mountain range areas. *Hydrological Processes* 19, 659-672, doi: 10.1002/hyp.5623.
- François, B., Hingray, B., Hendrickx, F. and Creutin, J. D. (2014) Seasonal patterns of water storage as signatures of the climatological equilibrium between resource and demand. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 3787–3800.
- Gallart, F., Delgado, J., Beatson, S.J.V., Posner, H., Llorens, P., Marcé, R. (2011). Analysing the effect of global change on the historical trends of water resources in the headwaters of the Llobregat and Ter river basins (Catalonia, Spain). *Physics and Chemistry of the Earth* 36, 655–661, doi:10.1016/j.pce.2011.04.009
- Gallart, F., Llorens, P., Manzano, A. (2013). Gestión de la cuenca del Cardener para garantizar los Recursos de agua. En: CREA (E. Doblás ed.) *Conservar aprovechando. Cómo integrar el cambio global en la gestión de los montes españoles*. ISBN: 978-84-695-8587-0
- 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*, Logroño, 192 p.
- 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(3-4), 121-139. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.006>.

Garzón, B.M., R. Alía, M. Robson y M.A. Zavala. 2011. Intra-specific variability and plasticity influence potential tree species distributions under climate change. *Global Ecol. Biogeogr.* 646: 1-13.

Gaudard, L., Gilli, M. and Romerio, F. (2013) Climate change impacts on hydropower management. *Water Resources Management*, 27, 5143–5156.

Geneletti, D., L. Zardo, 2016, Ecosystem-based adaptation in cities: An analysis of European urban climate adaptation plans, *Land use policy*, 50, 38-47

Gerbaux, M., Spandre, P., François, H., George, E., & Morin, S. (2020). Fiabilité de l'enneigement et disponibilité des ressources en eau pour la production de neige dans les domaines skiables du Département de l'Isère (France), en conditions climatiques actuelles et futures. *Revue de Géographie Alpine*, 108–1, 0–20. <https://doi.org/10.4000/rga.6724>

Giorgetta, M.A., Jungclaus, J., Reick, C.H., Legutke, S., Bader, J., Böttinger, M., Brovkin, V., Crueger, T., Esch, M., Fieg, K., Glushak, K., Gayler, V., Haak, H., Hollweg, H.-D., Ilyina, T., Kinne, S., Kornbluh, L., Matei, D., Mauritsen, T., Mikolajewicz, U., Mueller, W., Notz, D., Pithan, F., Raddatz, T., Rast, S., Redler, R., Roeckner, E., Schmidt, H., Schnur, R., Segschneider, J., Six, K.D., Stockhause, M., Timmreck, C., Wegner, J., Widmann, H., Wieners, K.-H., Claussen, M., Marotzke, J., Stevens, B., 2013. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 5, 572–597.

Giuliani, M. and Castelletti, A. (2016) Is robustness really robust? How different definitions of robustness impact decision-making under climate change. *Climatic Change*, 135, 409–424.

Gobierno de Aragón, 2018. Catálogo aragonés de buenas prácticas agrarias: Para un desarrollo bajo en carbono y un sector agrario más resiliente al cambio climático en desarrollo de Agroclima. Dirección General de Sostenibilidad del Departamento de Desarrollo Rural y Sostenibilidad del Gobierno de Aragón. Zaragoza, España, 8 pp.

González-Ramón, A., Jódar, J., Samsó, J.M., Martos-Rosillo, S., Heredia, J., Zabaleta, A., Antigüedad, I., Custodio, E., Lambán, L.J. (2020). Hydrometeorological factors determining the development of water table cave patterns in high alpine zones. The Ordesa and Monte Perdido National Park, NE-Spain. *International Journal of Speleology*, 49(3):249-270. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.49.3.2346>.

González-Ramón, A., Jódar, J., Samsó, J.M., Martos-Rosillo, S., Heredia, J., Zabaleta, A., Antigüedad, I., Custodio, E., Lambán, L.J. 2020. Hydrometeorological factors determining the development of water table cave patterns in high alpine zones. The Ordesa and Monte Perdido National Park, NE-Spain. *International Journal of Speleology*, 49(3):249-270. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.49.3.2346>

Govern d'Andorra. (2014). Resultats del procés participatiu. <http://www.participa2014.cat/resultats/dades/ca/escr-tot.html>

Govern d'Andorra. (2016). Estratègia nacional de la biodiversitat d'andorra (ENBA). <https://www.mediambient.ad/biodiversitat>

Govern d'Andorra. (2018a). Pla sectorial d'infraestructures energètiques d'Andorra.

Govern d'Andorra. (2018b). Projecte de llei d'impuls de la transició energètica i del canvi climàtic (Litecc) - BCG 6/2018). 1–36.

Govern d'Andorra. (2021a). Estudi per a l'elaboració anual de l'inventari i quantificació de la despesa hídrica per usos del Principat d'Andorra -Any 2019-.

Govern d'Andorra. (2021b). Projecte de llei d'economia circular (LEC) - (BCG 76/2021). [http://www.consellgeneral.ad/aplics/Butlleti_Consell.NSF/d358b6a33e7b878f412566c100390c61/e2b7406d2b60691fc1256ba30024bdaf/\\$FILE/but23-2002.doc](http://www.consellgeneral.ad/aplics/Butlleti_Consell.NSF/d358b6a33e7b878f412566c100390c61/e2b7406d2b60691fc1256ba30024bdaf/$FILE/but23-2002.doc)

Grusson, Y., 2016. Modélisation de l'évolution hydroclimatique des flux et stocks d'eau verte et d'eau bleue du bassin versant de la Garonne.

Grusson, Y., Sun, X., Gascoïn, S., Sauvage, S., Raghavan, S., Anctil, F., Sáchez-Pérez, J.-M., 2015. *Journal of Hydrology* 531, 574–588.

Haasnoot, M., Kwakkel, J. H., Walker W. E., and ter Maat J. (2013). Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world. *Global Environmental Change*, 23(2): 485-498.

Hallegatte, S. (2009) Strategies to adapt to an uncertain climate change. *Global Environmental Change*, 19, 240–247.

Hansson, S.V., Claustres, A., Probst, A., De Vleeschouwer, F., Baron, S., Galop, D., Mazier, F., Le Roux, G., 2017. *Anthropocene* 19, 45–54.

Hansson, S.V., Grusson, Y., Chimienti, M., Claustres, A., Jean, S., Le Roux, G., 2019. *Science of The Total Environment* 671, 1227–1236.

Hashimoto, T., Stedinger, J. R. and Loucks, D. P. (1982) Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research*, 18, 14–20.

Hawkins, E. and Sutton, R. (2010) The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change. *Climate Dynamics*, 37, 407–418.

Hendrickx, F. and Sauquet, E. (2013) Impact of warming climate on water management for the Ariège River basin (France). *Hydrological Sciences Journal*, 58, 976–993.

<https://idena.navarra.es> (visitado 15 julio de 2021).

Huang, P. (2022) Towards a general framework for assessing the vulnerability of reservoir water management under global change - Application to the Neste system (French Pyrenees). Thèse de doctorat, Université de Grenoble.

Huang, P. (2022). Representation of a multipurpose reservoir system and vulnerability of water management under global change. Application to the Neste water system. Thèse, Université Grenoble Alpes.

Huang, P., Sauquet, E., B. François, and Vidal, J.-P. (2021) Challenges of reservoir planning and management under global change: impact and adaptation. Submitted to *WIRES Water*.

Huang, P., Sauquet, E., Vidal, J.-P., and Dariba, N. (2021) Vulnerability of water resource management to climatic changes: Application to a Pyrenean valley. Submitted to *Journal of Hydrology : Regional studies*.

IGME-OAPN 2013. Guía geológica del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. Guías Geológicas de Parques Nacionales. Instituto Geológico y Minero de España- Organismo Autónomo de Parques Nacionales, Madrid (Editorial Everest: 1–214).

IGME-OAPN, 2013. Guía geológica del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. Guías Geológicas de Parques Nacionales. Instituto Geológico y Minero de España- Organismo Autónomo de Parques Nacionales, Madrid (Editorial Everest: 1–214).

INE, Instituto Nacional de Estadística. 2019. Población de derecho y Padrón municipal. <https://www.ine.es/> (visitado 15 julio de 2021).

IPCC, 2014: Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resúmenes, preguntas frecuentes y recuadros multicapítulos. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea y L.L. White (eds.)]. Organización Meteorológica Mundial, Ginebra (Suiza), 200 págs. (en árabe, chino, español, francés, inglés y ruso)

Isoard, S., A. Prutsh, 2014, National adaptation policy processes in European countries. Retrieved from www.eea.europa.eu/publications/national-adaptation-policy-processes

Jódar, J., Custodio, E., Lambán, J.L., Martos-Rosillo, S., Herrera, C., Sapriza, G. 2016. Vertical variation in the amplitude of the seasonal isotopic content of rainfall as a tool to jointly estimate the groundwater recharge zone and transit times in the Ordesa and Monte Perdido National Park aquifer system, north-eastern Spain. *Science of The Total Environment*, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.117>.

Jódar, J., González-Ramón, A., Martos-Rosillo, S., Heredia, J., Herrera, C., Urrutia, J., Caballero, Y., Zabaleta, A., Antigüedad, I., Custodio, E., Lambán, L.J. (2020). Snowmelt as a determinant factor in the hydrogeological behaviour of high mountain karst aquifers: The Garcés karst system, Central Pyrenees (Spain). *Science of The Total Environment*, 748-141363. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141363>.

Jódar, J., González-Ramón, A., Martos-Rosillo, S., Heredia, J., Herrera, C., Urrutia, J., Caballero, Y., Zabaleta, A., Antigüedad, I., Custodio, E., Lambán, L.J. 2020. Snowmelt as a determinant factor in the hydrogeological behaviour of high mountain karst aquifers: The Garcés karst system, Central Pyrenees (Spain). *Science of The Total Environment*, 748-141363. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141363>.

Jódar, J., Herms, I., Lambán, L.J., Martos-Rosillo, S., Herrera, C., Urrutia, J., Soler, A., Custodio, E. 2022. Isotopic content in high mountain karst aquifers as a proxy for climate change impact in Mediterranean zones: The Port del Comte karst aquifer (SE Pyrenees, Catalonia, Spain). *Science of The Total Environment*, 148036. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148036>

Jódar, J., Lambán, L.J., Medina, A., Custodio, E. 2014. Exact analytical solution of the convolution integral for classical hydrogeological lumped-parameter models and typical input tracer functions in natural gradient systems. *Journal of Hydrology*, 519: pp 3275–3289, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.027>

Keiler, M., Knight, J., & Harrison, S. 2010. Climate change and geomorphological hazards in the eastern European Alps. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1919), 2461-2479.

Kellner, E. (2021) The controversial debate on the role of water reservoirs in reducing water scarcity. *WIREs Water*, 8.

Keys, P.W., Wang-Erlandsson, L., Gordon, L.J. (2016). Revealing Invisible Water: Moisture Recycling as an Ecosystem Service. *PLoS ONE* 11(3), doi:10.1371/journal.pone.0151993.

Kreibich, h., A. F. Van Loon, K. Schröter, Ph.J. Ward, M. Mazzoleni, N. Sairam, G. Wakbulcho Abeshu, S. Agafonova, A. AghaKouchak, H. Aksoy, C. Alvarez-Garreton, B.Aznar, L. Balkhi, M.H. Barendrecht, S. Biancamaria, L. Bos-Burgering, C. Bradley, Y. Budiyo, W. Buytaert, L. Capewell, H. Carlson, Y. Cavus, A. Couasnon, G. Coxon, I. Daliakopoulos, M.C. de Ruiter, C. Delus, M. Erfurt, G. Esposito, D. François, F. Frappart, J. Freer, N. Frolova, A.K. Gain, M. Grillakis, J. O. Grima, D.A. Guzmán, L.S. Huning, M. Ionita, M. Kharlamov, D. Nguyen Khoi, N. Kieboom, M. Kireeva, A. Koutroulis, W. Lavado-Casimiro, H. Li, M.C. LLasat, D. Macdonald, J. Mård, H. Mathew-Richards, A. McKenzie, A. Mejia, E. M. Mendiondo, M. Mens, S. Mobini, G. Samprogna Mohor, V. Nagavciuc, T. Ngo-Duc, H. Thi Thao Nguyen, P. Thi Thao Nhi, O. Petrucci, N. Hong Quan, P. Quintana-Seguí, S. Razavi, E. Ridolfi, J. Riegel, S. Sadik, E. Savelli, A. Sazonov, S. Sharma, J. Sörensen, F. A. Arguello Souza, K. Stahl, M. Steinhausen, M.I Stoelzle, W. Szalińska, Q. Tang, F. Tian, T. Tokarczyk, C. Tovar, T. Van Thu Tran, M. van Huijgevoort, M. van Vliet, S. Vorogushyn, T. Wagener, Y. Wang, D. E. Wendt, E. Wickham, L. Yang, M. Zambrano-Bigiarini, G. Blöschl, G. Di Baldassarre. (2022) The challenges of unprecedented floods and droughts in risk management. *Nature* 608, 80–86. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04917-5>.

Lambán Jiménez, L., & Jodar Bermúdez, J. (2021). Impactos del cambio climático en áreas de especial valor ambiental: presión turística, cambio climático y calidad ambiental.

Lambán, L., Jódar, J., 2022. 6 Impactos del cambio climático en áreas de alto valor ambiental: presión turística, cambio climático y calidad ambiental en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. En (Beguería et al., 2022) Adaptación al cambio climático en la gestión de los recursos hídricos de los Pirineos. Memorias científicas del proyecto PIRAGUA, vol. 2. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Zaragoza, España, xx-xx. <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14684>.

Lambán, L.J., Jódar, J., Custodio, E. 2018. Investigaciones hidrogeológicas en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. XIV Congreso Latinoamericano de Hidrogeología, X Congreso Argentino de Hidrogeología y VIII Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología Subterránea. Salta (Argentina)

Lambán, L.J., Jódar, J., Custodio, E., Soler, A., Sapriza, G., Soto, R., 2015. Isotopic and hydrogeochemical characterization of high-altitude karst aquifers in complex geological settings. The Ordesa and Monte Perdido National Park (Northern Spain) case study. *Sci. Total Environ.* 506, 466–479. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.11.030>.

Lambán, L.J., Jódar, J., Custodio, E., Soler, A., Sapriza, G., Soto, R. 2015. Isotopic and hydrogeochemical characterization of high-altitude karst aquifers in complex geological settings. The Ordesa and Monte Perdido National Park (Northern Spain) case study. *Sci. Total Environ.* 506, 466–479. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.11.030>.

Le Roux, G., & Caxir, R. (2021). Transformation du territoire et dynamique hydrologique dans les têtes de bassin versant.

Leenhardt, D., Trouvat, J.-L. (2004) ADEAUMIS, un outil pour estimer la demande en eau d'irrigation à l'échelle régionale - Exemple d'utilisation en temps de crise. *Ingénieries eau-agriculture-territoires*, 40, 37-49.

Lempert, R. J., Groves, D. G., Popper, S.W. and Bankes, S. C. (2006) A general, analytic method for generating robust strategies and narrative scenarios. *Management Science*, 52, 514–528.

Lewis, V. (2006). *The Wild Trout Survival Guide: Habitat and Fishery Management Guidelines* (The Wild Trout (ed.)).

LIFE NAdapta: Estrategia integrada para la adaptación al cambio climático en Navarra. <https://lifenadapta.navarra.es/es/>.

Llasat-Botija, M., M. Cortès, M.C. Llasat, 2019, The use of citizen information in post-event analysis of flash floods in Catalonia, *Retours d'expériences post-catastrophes naturelles*, Collection "Géorisques". n. 8, pp. 31-42.

Llasat-Botija, M., M. Cortès, M.C. Llasat, 2018, FLOODUP. Una herramienta para aumentar la información y mejorar el conocimiento colectivo sobre eventos meteorológicos extremos, *El Clima: aire, agua, tierra y fuego*, pp. 645-654, Publicaciones de la Asociación Española de Climatología, D.L.: M-31443-2018.

Llasat, M.C., A. del Moral, M. Cortès, T. Rigo, 2021. Convective precipitation trends in the Spanish Mediterranean region, *Atmospheric Research* 257 (2021) 10558. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105581>.

Lloret., F. (2016) Un paseo por la resiliencia. Blog del Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF), <https://blog.creaf.cat/es/conocimiento/un-paseo-por-la-resiliencia/> (última visita julio de 2022).

López-Moreno, J. I., Beguería, S., García-Ruiz, J. M. (2006). Trends in high flows in the central Spanish Pyrenees: response to climatic factors or to land-use change?. *Hydrol. Sci. J.* 51(6), 1039-1050. <https://doi.org/10.1623/hysj.51.6.1039>.

López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Zabalza, J., Revuelto, J., Gilaberte, M., Azorin-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.

Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Morán-Tejeda, E., & Zabalza, J. (2012). Recent trends in Iberian streamflows (1945-2005). *Journal of Hydrology*, 414–415, 463–475. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.023>

Maier, H., Guillaume, J., van Delden, H., Riddell, G., Haasnoot, M. and Kwakkel, J. (2016) An uncertain future, deep uncertainty, scenarios, robustness and adaptation: How do they fit together? *Environmental Modelling & Software*, 81, 154–164.

Małozzewski, P., Zuber, A. 1982. Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers, I. Models and their applicability. *J. Hydrol.* 57, 207–231. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(82\)90147-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(82)90147-0)

Manzano, A. (2009). Exemples de modelització hidrològica en règim mitjà del rius catalans en escenaris futurs. En: *Aigua i canvi climàtic: Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya*. Generalitat de Catalunya - Agència Catalana de l'Aigua, Barcelona, pp. 127–141.

Maran, S., Volonterio, M. and Gaudard, L. (2014) Climate change impacts on hydropower in an Alpine catchment. *Environmental Science & Policy*, 43, 15–25.

Martos-Rosillo, S., González-Ramón, A., Ruiz-Constán, A., Marín-Lechado, C., Guardiola-Albert, C., Moral Martos, F., Jódar, J., Pedrera-Parias, A. 2019. El manejo del agua en las cuencas de alta montaña del Parque Nacional de Sierra Nevada (Sur de España). Un ejemplo ancestral de Gestión Integral del Agua. *Boletín Geológico y Minero*, 130 (4): 729-742. <https://doi.org/10.21701/bolgeomin.130.4.008>

McMillan, H., Montanari, A., Cudennec, C., Savenije, H., Kreibich, H., Krueger, T., Liu, J., Mejia, A., Loon, A. V., Aksoy, H., Baldassarre, G. D., Huang, Y., Mazvimavi, D., Rogger, M., Sivakumar, B., Bibikova, T., Castellarin, A., Chen, Y., Finger, D., Gelfan, A., Hannah, D. M., Hoekstra, A. Y., Li, H., Maskey, S., Mathevet, T., Mijic, A., Acuña, A. P., Polo, M. J., Rosales, V., Smith, P., Viglione, A., Srinivasan, V., Toth, E., vanNooyen, R. and Xia, J. (2016) *Panta Rhei 2013–2015: Global perspectives on hydrology, society and change*. *Hydrological Sciences Journal*, 1–18.

MITECO, 2020, Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC): <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/plan-nacional-adaptacion-cambio-climatico/default.aspx>

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in watershed Simulations. *2007 American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885–900.

Mountain Agenda. (2001). Mountains of the world. Mountains, Energy and Transport. <https://lib.icimod.org/record/10814>.

MTES (2019). <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/hydroelectricite>.

NASTAT, Instituto Navarro de estadística. 2020. <http://www.navarra.es> (visitado 15 julio de 2021).

Noble, I.R., S. Huq, Y.A. Anokhin, J. Carmin, D. Goudou, F.P. Lansigan, B. Osman-Elasha, and A. Villamizar, 2014: Adaptation needs and options. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 833-868.

OECC. (2021a). Estratègia energètica nacional i de lluita contra el canvi climàtic 2020-2050.

OECC. (2021b). Estratègia energètica nacional i de lluita contra el canvi climàtic 2020-2050. https://www.bopa.ad/bopa/033019/Documents/Memòria_GD20210204_16_16_19.pdf

OPCC-CTP (2018). El cambio climático en los Pirineos: impactos, vulnerabilidades y adaptación - Bases de conocimiento para la futura estrategia de adaptación al cambio climático en los Pirineos. Observatorio Pirenaico del Cambio Climático (OPCC), Jaca, 149 pp. <https://www.opcc-ctp.org/sites/default/files/documentacion/opcc-informe-es-print.pdf>.

OPCC-CTP (2021). La Estrategia Pirenaica de Cambio Climático: una estrategia para la cooperación en la acción climática.

OPCC-CTP. 2018. El cambio climático en los Pirineos: impactos vulnerabilidades y adaptación. Bases para la estrategia pirenaica de adaptación al cambio climático. Observatorio Pirenaico de Cambio Climático-Comunidad de Trabajo de los Pirineos, Jaca.

OPCC, 2013: Estudio sobre la adaptación al cambio climático en los Pirineos. Análisis de las iniciativas de adaptación en los Pirineos. Observatorio Pirenaico del cambio Climático. Mayo 2013

OPCC, 2013b: Estudio sobre la adaptación 2011-2012. 1a fase. OPCC. El clima cambia los Pirineos se adaptan

OPCC, 2019. Informe final 2019. Resultados del proyecto OPCC2 y proyectos asociados: CLIM'PY, REPLIM, CANOPEE, FLORAPYR, PIRAGUA. Octubre 2019.

OPCC. (2013). Estudio sobre la adaptación al cambio climático en los Pirineos - Perfil de los Pirineos. [http://www.opcc-ctp.org/images/espacedocumentaire/publications/ADAPTATION/adaptacion-perfil](http://www.opcc-ctp.org/images/espacedocumentaire/publications/ADAPTATION/adaptacion-perfil_definitivo.pdf) definitivo.pdf

Palau, A., Alcázar, J. (2012). The basic flow method for incorporating flow variability in environmental flows. *River Research and Applications* 28, 93–102. <https://doi.org/10.1002/rra.1439>.

Paul JD, Hannah DM and Liu W (2019) Editorial: Citizen Science: Reducing Risk and Building Resilience to Natural Hazards. *Front. Earth Sci.* 7:320. doi: 10.3389/feart.2019.00320.

Payne, J., Wood, A., Hamlet, A., Palmer, R. and Lettenmaier, D. (2004) Mitigating the effects of climate change on the water resources of the Columbia River basin. *Climatic Change*, 62, 233–256.

Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A. 2007. Updated world map of the Köppen–Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11, 1633–1644. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>

Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A., 2007. Updated world map of the Köppen–Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11, 1633–1644. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.

Pereira-Cardenal, S. J., Madsen, H., Arnbjerg-Nielsen, K., Riegels, N., Jensen, R., Mo, B., Wangensteen, I. and Bauer-Gottwein, P. (2014) Assessing climate change impacts on the Iberian power system using a coupled water-power model. *Climatic Change*, 126, 351–364.

PIRAGUA. (2021). Evaluación y prospectiva de los recursos hídricos de los Pirineos en un contexto de cambio climático. Caracterización de los recursos hídricos y escenarios futuros.

Pisani, B. 2008. Acoplamiento de modelos hidrológicos semidistribuidos y sistemas de información geográfica. Tesis Doctoral. Universidad de la Coruña. <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/1102>

Pisani, B., 2008. Acoplamiento de modelos hidrológicos semidistribuidos y sistemas de información geográfica. Tesis Doctoral. Universidade da Coruña. <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/1102> (verificado en mayo de 2019).

Plan Director del Ciclo Integral del Agua de Uso Urbano de Navarra. 2019. Gobierno de Navarra. <https://gobiernoabierto.navarra.es/es/participacion/procesos/plan-director-del-ciclo-integral-del-agua-uso-urbano> (visitado 15 julio de 2021).

Polo, E. 2015. Uso y manejo de nuevas tecnologías y herramientas SIG a partir de datos hidrogeológicos en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. Department of Geography and Regional Planning, University of Zaragoza.

Polo, E., 2015. Uso y manejo de nuevas tecnologías y herramientas SIG a partir de datos hidrogeológicos en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. Department of Geography and Regional Planning, University of Zaragoza.

Pons, M., López-Moreno, J., Revuelto, J., Alonso, E., Vilella, M., Travesset-Baro, O., Apodaka, J., Pesado, C., Margalef, M., & Iravani, P. (2018). Remote sensing techniques for helping decision-making in the management of ski areas. International Snow Science Workshop 2018, 548–552.

Popa, F., Dumitran, G. E., Vuta, L. I., Tica, E. I., Popa, B., & Neagoe, A. (2020). Impact of the ecological flow of some small hydropower plants on their energy production in Romania. Journal of Physics: Conference Series, 1426(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1426/1/012043>

Portela, R., Bezerra, M.O., Alam, M., Shaad, K., Banerjee, O., Honzák, M. (2019). Discussion paper 8: Water Supply Services. Expert Meeting on Advancing the Measurement of Ecosystem Services for Ecosystem Accounting, New York. <https://seea.un.org/events/expert-meeting-advancing-measurement-ecosystem-services-ecosystem-accounting>.

Price, M.F y G.R. Neville. 2003. Designing strategies to increase the resilience of alpine/montane systems to climate change. . En: WWF. Buying time: a user's manual for building resistance and resilience to climate change in natural systems. WWF Climate Program, Berlin.

Prudencio, G. (2021, April 9). La nieve artificial ya cubre más de la mitad de las pistas de las principales estaciones de esquí por el cambio climático. El *Diario.Es*. https://www.eldiario.es/ballenablanca/economia/nieve-artificial-cubre-mitad-pistas-principales-estaciones-esqui-cambio-climatico_1_7394296.html

Pushpalatha, R., Perrin, C., Moine, N., Mathevet, T., and Andréassian, V. (2011) A downward structural sensitivity analysis of hydrological models to improve lowflow simulation. Journal of Hydrology, 411, 66–76. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.09.034>.

Quintana, P., Beguería, S., Barella, A., Caballero, Y., Cakir, R., Cenobio, O., Clavera-Gispert, R., Dewandel, B., Grusson, Y., Hevin, G., Jódar, J., Lambán, L.J., Lanini, S., Le Cointe, P., Palazón, L., Sánchez-Pérez, J.M., Sauvage, S., 2022. Modelización del balance hídrico de los Pirineos en la actualidad (1981-2010). En Beguería S. (coord.), Caracterización de los recursos hídricos de los Pirineos en la actualidad, y escenarios futuros. Memorias científicas del proyecto PIRAGUA, vol. 1. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Saragosse, Espagne, xx-xx. <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14683>.

Recaño, J. (2021). Projecció de la població d'andorra, 2021-2031.

RECO. (2021). Cahier Régional Occitanie sur les Changements. Climatiques, édition 2021.

Reynard, E. (2020). Mountain Tourism and Water and Snow Management in Climate Change Context. *Revue de Géographie Alpine*, 108–1, 0–7. <https://doi.org/10.4000/rga.6816>

Riegos del Alto Aragón (2018) Memoria anual año 2018. https://issuu.com/riegosaltoaragon/docs/memoria_2018 (último acceso: junio de 2021).

Ríos-Aragüés, L.M. 2003. Introducción al mapa geológico del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. *Sociedad Española de Espeleología y Ciencias del Karst (SEDECK)*. Boletín 5, 84–99.

Ríos-Aragüés, L.M., 2003. Introducción al mapa geológico del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. *Sociedad Española de Espeleología y Ciencias del Karst (SEDECK)*. Boletín 5, 84–99.

Rosset, T., 2019. Transfert de carbone organique des tourbières vers les eaux de surfaces : quantification, identification des mécanismes de contrôles et détermination de l'influence des activités anthropiques locales.

RTE (2019). <https://bilan-electrique-2019.rte-france.com/production-totale>.

Samper, J., Huguet, Ll., Ares, J. y García Vera, M.A. 1999. Manual del usuario del programa VISUAL BALAN v.1.0: Código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga. *Publicación Técnica de ENRESA n° 5/99*, Madrid. 205 pp.

Samper, J., Huguet, Ll., Ares, J., and García Vera, M.A. 1999. Manual del usuario del programa VISUAL BALAN v1.0: código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga. *ENRESA (05/99)*. Madrid. 134 pp.

Samper, J., Pisani, B., and Espinha-Marques, J. 2015. Hydrological models of interflow in three Iberian mountain basins. *Environ Earth Sci*, 73(6):2645–2656. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3676-9>.

Samper, J., Pisani, B., Espinha Marques, J. 2015. Hydrological models of interflow in three Iberian mountain basins. *Environmental Earth Sciences* (73-6), 2645-2656, <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3676-9>

Sans, F., 2022. Gobernanza de los recursos hídricos de los Pirineos y estrategias de adaptación. En (Beguería et al., 2022) Adaptación al cambio climático en la gestión de los recursos hídricos de los Pirineos. Memorias científicas del proyecto PIRAGUA, vol. 2. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Zaragoza, España, xx-xx <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14684>.

Sauquet, E., Le Coent, Ph., Huang, P., Vidal, J.-P., 2022. Impacts du changement climatique sur la gestion de réservoirs de production hydroélectrique : le cas des vallées des Nestes d'Aure et du Louron. En (Beguería et al., 2022) Adaptación al cambio climático en la gestión de los recursos hídricos de los Pirineos. Memorias científicas del proyecto PIRAGUA, vol. 2. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Zaragoza, España, xx-xx. <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14684>.

Sauquet E., Richard B., Devers A., and Prudhomme C. (2019) Water restrictions under climate change: a Rhône–Mediterranean perspective combining bottom-up and top-down approaches. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23, 3683–3710.

Sauquet, E., Arama, Y., Blanc-Coutagne, E., Bouscasse, H., Branger, F., Braud, I., Brun, J.-F., Chérel, Y., Cipriani, T., Datry, T., Ducharne, A., Hendrickx, F., Hingray, B., Krowicki, F., Le Goff, I., Le Lay, M., Magand, C., Malerbe, F., Mathevet, T., Mezghani, A., Monteil, C., Perrin, C., Poulhe, P., Rossi, A., Samie, R., Strosser, P., Thirel, G., Tilmant, F. and Vidal J.-P. (2016) Le partage de la ressource en eau sur la Durance en 2050 : vers une évolution du mode de gestion des grands ouvrages duranciens ? *La Houille Blanche*, 5: 1-6.

Sauquet, E., Le Coent, P., Huang, P., & Vidal, J.-P. (2021). Impacts du changement climatique sur la gestion de réservoirs de production hydroélectrique.

Scott, D. (2006). Global environmental change and mountain tourism. *Tourism and Global Environmental Change*, 54–75.

Seguret, M. 1972. Étude tectonique des nappes et séries décollées de la partie centrale du versant sud des Pyrénées. Pub. USTELA, Ser. Geol. Struct. n.2, Montpellier

Seguret, M., 1972. Étude tectonique des nappes et séries décollées de la partie centrale du versant sud des Pyrénées. Pub. USTELA, Ser. Geol. Struct. n.2, Montpellier.

Stefanescu, C., J. Peñuelas, and I. Filella. 2003. Effects of climatic change on the phenology of butterflies in the northwest Mediterranean Basin. *Global Change Biology*, 9: 1494–1506. doi:10.1046/j.1365-2486.2003.00682.x

Tennant, D. L. (1976). Instream Flow Regimens for Fish, Wildlife, Recreation and Related Environmental Resources. *Fisheries*, 1(4), 6–10. [https://doi.org/10.1577/1548-8446\(1976\)001<0006:ifrffw>2.0.co;2](https://doi.org/10.1577/1548-8446(1976)001<0006:ifrffw>2.0.co;2).

Tognetti, S., Mendoza, G., Aylward, B., Southgate, D., García, L. (2004). A Knowledge and Assessment Guide to Support the Development of Payment Arrangements for Watershed Ecosystem Services (PWES). Prepared for the World Bank Environment Department.

Tomer, M.D., Schilling, K.E. (2009). A simple approach to distinguish land-use and climate-change effects on watershed hydrology. *J. Hydrol.* 376, 24–33, <https://doi.org/10.1016/j.hydrol.2009.07.029>.

Turco, M., M. C. Llasat, A. Tudela, X. Castro, and A. Provenzale, (2013). Decreasing fires in a Mediterranean region (1970–2010, NE Spain). *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13, 649–652, 2013. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-649-2013>.

UICN, 2018. Les Solutions fondées sur la Nature pour lutter contre les changements climatiques et réduire les risques naturels en France. Paris, France.

Van Vliet, M. T. H., Sheffield, J., Wiberg, D., & Wood, E. F. (2016). Impacts of recent drought and warm years on water resources and electricity supply worldwide. *Environmental Research Letters*, 11(12). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/12/124021>

Van Vliet, M. T. H., Wiberg, D., Leduc, S. and Riahi, K. (2016) Power-generation system vulnerability and adaptation to changes in climate and water resources. *Nature Climate Change*, 6, 375–380

VanRheenen, N. T., Wood, A. W., Palmer, R. N. and Lettenmaier, D. P. (2004) Potential implications of PCM climate change scenarios for Sacramento–San Joaquin River basin hydrology and water resources. *Climatic Change*, 62, 257–281.

Velychko, S., & Dupliak, O. (2021). Estimation of the Ecological Flow of Mountain River in Ukrainian Carpathians for Small Hydropower Projects. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 100 LNCE, 490–498. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_60

Volodin, E.M., Diansky, N.A., Gusev, A.V., 2013. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 49, 347–366.

VVAA FAO. (2008). Sistemas de Riego. Factores que se deben considerar para seleccionar el sistema de riego mas adecuado. *Sistemas de Riego*, 148, 29–37.

Watanabe, S., Hajima, T., Sudo, K., Nagashima, T., Takemura, T., Okajima, H., Nozawa, T., Kawase, H., Abe, M., Yokohata, T., Ise, T., Sato, H., Kato, E., Takata, K., Emori, S., Kawamiya, M., 2011. *Geoscientific Model Development* 4, 845–872.

Wilson, D., Hisdal, H., & Lawrence, D. (2010). Has streamflow changed in the Nordic countries? - Recent trends and comparisons to hydrological projections. *Journal of Hydrology*, 394(3–4), 334–346. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.09.010>

Xiao-Ge, X., Tong-Wen, W., Jiang-Long, L., Zai-Zhi, W., Wei-Ping, L., Fang-Hua, W., 2013a. *Atmospheric and Oceanic Science Letters* 6, 21–26.

Xiao-Ge, X., Tong-Wen, W., Jie, Z., 2013b. *Advances in Climate Change Research* 4, 41–49.

Yukimoto, S., Adachi, Y., Hosaka, M., Sakami, T., Yoshimura, H., Hirabara, M., Tanaka, T.Y., Shindo, E., Tsujino, H., Deushi, M., Mizuta, R., Yabu, S., Obata, A., Nakano, H., Koshiro, T., Ose, T., Kitoh, A., 2012. □□□□. □2□ 90A, 23–64.

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. (coord.), *Caracterización de los recursos hídricos de los Pirineos en la actualidad, y escenarios futuros*. Memorias científicas del proyecto PIRAGUA, vol. 1. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Saragosse, Espagne, xx-xx. <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14683>.

Zabaleta, A., Garmendia, E., Mariel, P., Tamayo, I., Antigüedad, I. (2018). Land cover effects on hydrologic services under a precipitation gradient. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22, 5227-5241, doi: 10.5194/hess-22-5227-2018

Zabaleta, A., Izagirre, E., Meaurio, M., Valiente, M., Uriarte, J.A., Antigüedad, I. (2021). 2030 Agendako Helburuetatik Lurra-Ura hartzera (From Agenda 2030 goals to land-water management). EKAIA, EHUko Zientzia eta Teknologia Aldizkaria. Número especial Agenda 2030, 229-246. UPV/EHU Press. E-ISSN: 2444-3255, <https://doi:10.1387/ekaia.22113>.

Zamarbide, G., Salles, D., Bosche, C., & Cazals, C. (2018). Rapport de la performance de la participation du public. Projet AGUAMOD.

Zamora, R., A.J. Pérez-Luque, F.J. Bonet, J.M. Barea-Azcón, y R. Aspizua, (editores). 2015. La huella del cambio global en Sierra Nevada: retos para la conservación. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Junta de Andalucía. 208 pp.

Zarfl, C., Lumsdon, A. E., Berlekamp, J., Tydecks, L. and Tockner, K. (2015) A global boom in hydropower dam construction. *Aquatic Sciences*, 77, 161–170.

Zhang, L., Dawes, W.R., Walker, G.R. (2001). Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research* 37(3), 701-708.

Socios



Asociados



Con apoyo de



Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER)
Fonds Européen de Développement Régional (FEDER)

