



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





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**

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

ISBN: 978-84-09-06268-3

Coordinación y edición de textos: Juan Terrádez e Idoia Arauzo

Diseño de la portada: La Page Original

Edición gráfica y maquetación: Collserola

Foto de portada: © OPCC

Aviso legal

El contenido de esta publicación no refleja necesariamente las opiniones oficiales del Observatorio Pirenaico del Cambio climático u otras instituciones de la Unión Europea. Ni el Observatorio Pirenaico del Cambio Climático ni ninguna persona que actúe en nombre del OPCC es responsable del uso que pueda hacerse de la información contenida en este informe.

Aviso de copyright



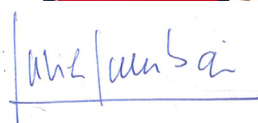
Reconocimiento-NoComercial (CC BY-NC)

Esta licencia permite a otros entremezclar, ajustar y construir a partir de su obra con fines no comerciales, y aunque en sus nuevas creaciones deban reconocerle su autoría y no puedan ser utilizadas de manera comercial, no tienen que estar bajo una licencia con los mismos términos.

Descarga el informe completo y el resumen ejecutivo en ES, FR, CAT o EN en el portal de información del Observatorio Pirenaico del Cambio Climático: <https://opcc-ctp.org/>

Impacto sobre el cambio climático en los Pirineos

Desde su lanzamiento en 2010 bajo la presidencia de Midi-Pyrénées, el Observatorio Pirenaico del Cambio Climático de la Comunidad de Trabajo de los Pirineos (CTP) ha trabajado analizando la vulnerabilidad al cambio climático de las distintas poblaciones, sectores sociales, económicos y naturales del espacio pirenaico transfronterizo, a través del desarrollo de metodologías adecuadas para ello y bajo el prisma de la cooperación. Durante 2018 y siguiendo la línea de trabajo del Observatorio, la CTP ha elaborado un informe en el que se actualiza el conocimiento sobre las repercusiones del cambio climático en el territorio pirenaico transfronterizo. Este informe recoge las bases científicas sobre los impactos del cambio climático y su repercusión en el territorio, así como un compendio de recomendaciones sectoriales de adaptación formuladas en consecuencia. Estas bases de conocimiento son indispensables para orientar las políticas en materia de adaptación al cambio climático de manera más eficaz, para aprovechar las oportunidades emergentes y maximizar las sinergias positivas con otras políticas sectoriales. Su valor añadido reside sin lugar a duda en el espíritu de cooperación que ha marcado tanto su concepción como su redacción. En él han participado alrededor de 100 científicos y expertos de referencia provenientes de ambas vertientes de los Pirineos. Han colaborado en su redacción así como en los varios procesos de revisión que otorgan a este documento un amplio consenso científico. Es necesario subrayar que sin la larga trayectoria de cooperación, trabajo en red y proyección internacional con organismos como la Convención de los Alpes, la Convención de los Cárpatos o la Agencia Europea de Medio Ambiente, sería imposible crear documentos de referencia como el presente informe. La visión de este informe es la propia del Observatorio, que concibe los Pirineos como una única "bioregión" que no entiende de límites administrativos y cuyos sistemas socioeconómicos y biofísicos presentan una especial vulnerabilidad al cambio climático. Las evidencias científicas recogidas en este informe ponen de manifiesto, lo mismo que otros estudios ya han demostrado en otros territorios: las zonas de montaña están experimentando aumentos de temperatura superiores a las zonas llanas y por lo tanto los impactos del cambio climático son más intensos. En concreto para los Pirineos ya se están observando impactos en todos los sectores naturales y socioeconómicos como la desaparición acelerada de ecosistemas sensibles y elementos iconográficos como los glaciares; la alteración del ciclo de vida de muchas especies, entre ellas algunas endémicas; la incidencia del cambio climático en los riesgos naturales, en las actividades ligadas al turismo, en la agricultura o los cambios observados en el ciclo hidrológico. El cambio climático se posiciona como un factor de estrés añadido que agrava los problemas ya conocidos en el territorio pirenaico como la despoblación, los cambios de usos del suelo o la falta de relevo generacional en el sector primario. Desde la CTP se entiende la lucha contra el cambio climático y la adaptación a sus impactos como instrumentos transversales que ofrecen multitud de oportunidades para abordar los desafíos de los Pirineos que son a la vez desafíos globales. De esta manera, la CTP, desde la acción local, contribuye a la consecución del Objetivo 13, Acción por el Clima, de la Agenda 2030 de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas.

D. Francisco Javier Lambán Montañés
Presidente de la CTP

1. Clima y Variabilidad Climática en los Pirineos	6
1.1 El clima del periodo glacial y la deglaciación	6
1.1.1 El clima del Holoceno	6
1.1.2 Los últimos 2000 años	7
1.2 El clima actual	10
1.2.1 Evolución de la temperatura media anual y estacional	10
1.2.2 Evolución de la precipitación anual y estacional	11
1.2.3 Evolución del manto de nieve en los Pirineos	13
1.3 Proyecciones de cambio climático en los Pirineos	16
2. El Impacto del CC en los sectores biofísicos	18
2.1 El cambio climático durante el Holoceno	18
2.2 Biodiversidad de montaña: fauna	22
2.2.1 Cambios en la productividad y abundancia de las especies	22
2.2.2 Modificaciones del ciclo de vida (alteraciones fenológicas) y de las interacciones entre especies	24
2.2.3 Modificaciones en la distribución geográfica	26
2.2.4 Alteraciones de las interacciones ecológicas y del funcionamiento de los ecosistemas	30
2.2.5 Mayor riesgo de invasión y/o expansión de especies exóticas	32
2.2.6 Impacto en la interconexión entre las redes de espacios protegidos	33
2.2.7 Conclusiones y recomendaciones	33
2.3 Biodiversidad de montaña: flora	36
2.3.1 Alteraciones fisiológicas y cambios en la productividad y abundancia de las especies	37
2.3.2 Cambios del ciclo vital (cambios fenológicos)	37
2.3.3. Alteraciones ecológicas y del funcionamiento de los ecosistemas	38
2.3.4 Cambios en la composición y en las interacciones entre especies en la comunidad ecológica	38
2.3.5 Vulnerabilidades y servicios ecosistémicos	41
2.3.6 Conclusiones y recomendaciones	42
2.4 Bosques	44
2.4.1 Los impactos potenciales del cambio climático en la diversidad de comunidades vegetales y sobre la distribución de las especies forestales	44
2.4.2 Alteración de la productividad de los bosques y papel de los bosques como sumideros de carbono	47
2.4.3 El impacto del cambio climático sobre el papel de los bosques en la atenuación de los riesgos naturales	49
2.4.4 Alteración de las condiciones de salud de los bosques y posible desequilibrio con las comunidades de agentes patógenos	51
2.4.5 Impacto del cambio climático sobre el riesgo de incendios forestales en los Pirineos	54
2.4.6 Conclusiones y recomendaciones	56
2.5. Ecosistemas sensibles de alta montaña: lagos y turberas	58
2.5.1 Características de los lagos y turberas pirenaicos	58
2.5.2 Procesos en lagos y turberas de alta montaña en un contexto de cambio climático	59
2.5.3 Impactos previstos	62
2.5.4 Principales desafíos	64
2.5.5 Conclusiones y recomendaciones	64
2.6 Ciclo hidrológico y recursos hídricos	66
2.6.1 Cambios en las aguas superficiales: aportación anual	68
2.6.2 Cambios en las aguas superficiales: régimen mensual	70
2.6.3 Cambios en las aguas subterráneas y en las surgencias	70
2.6.4 Cambios en las características físico-químicas de las masas de agua	73
2.6.5 Cambios en la composición biológica de las masas de agua	74
2.6.6 Conclusiones y recomendaciones para la adaptación	76

3. Impacto del cambio climático en los sectores socioeconómicos	78
3.1. Turismo	78
3.1.1 Reducción del atractivo turístico invernal de las estaciones de esquí	78
3.1.2 Alteración de elementos iconográficos del paisaje Pirenaico	82
3.1.3 Incremento del riesgo de las infraestructuras turísticas a los fenómenos hidrológicos, geológicos y eventos climáticos extremos	83
3.1.4 Prolongación de la estación de turismo de montaña	83
3.1.5 Conclusiones y recomendaciones	85
3.2 Agropastoralismo de montaña	87
3.2.1 Impactos y vulnerabilidades en el sector agrícola	87
A. Desplazamiento de las áreas de idoneidad de los cultivos	87
B. Cambios en los rendimientos de los cultivos	88
C. Expansión de plagas y enfermedades agrícolas	92
3.2.2 Pastos naturales de montaña: impactos y vulnerabilidades	94
A. Cambios en la producción y la calidad de los pastos	94
B. Alteraciones en la composición florística y de la diversidad	95
3.2.3 Sector ganadero extensivo: Impactos y vulnerabilidades	96
A. Reducción del bienestar animal y de la producción ganadera	96
B. Nuevas zoonosis y difusión de enfermedades del ganado	97
3.2.4 Conclusiones y recomendaciones	98
3.3 Energía	102
3.3.1 Disminución de la capacidad de producción de energía hidroeléctrica	102
3.3.2 Disminución de la eficiencia en la producción de energía termoeléctrica	104
3.3.3 Cambio climático y energías renovables	104
3.3.4 Variación estacional de la demanda energética	106
3.3.5 Incremento del riesgo de daños a las infraestructuras energéticas	107
3.3.6 Conclusiones y recomendaciones	108
3.4 Riesgos naturales	111
3.4.1 Aumento de los fenómenos meteorológicos extremos	111
3.4.2 Aumento de la frecuencia de inundaciones y crecidas	113
3.4.3 Aumento de los deslizamientos y desprendimientos de rocas	115
3.4.4 Mayores riesgos relacionados con la degradación del permafrost	115
3.4.5 Avalanchas	117
3.4.6 Diseñar una estrategia de adaptación a los riesgos naturales en el futuro	118
3.4.7 Conclusiones y recomendaciones	119
Bibliografía	124
1. Clima y Variabilidad Climática en los Pirineos	124
1.1. El clima del periodo glacial y la deglaciación	124
1.2. El clima actual	125
1.3. Proyecciones de cambio climático en los Pirineos	125
2. El Impacto del CC en los sectores biofísicos	128
2.1 El cambio climático durante el Holoceno	128
2.2 Biodiversidad de montaña: fauna	128
2.3 Biodiversidad de montaña: flora	131
2.4 Bosques	133
2.5 Ecosistemas sensibles de alta montaña: lagos y turberas	136
2.6 Ciclo hidrológico y recursos hídricos	137
3. Impacto del cambio climático en los sectores socioeconómicos	140
3.1 Turismo	140
3.2 Agropastoralismo de montaña	142
3.3 Energía	143
3.4 Riesgos naturales	143

1. Clima y variabilidad climática en los Pirineos

Coordinadores: José María Cuadrat (unizar), Blas Valero Garcés (IPE-CSIC)

Autores: Ana Moreno (IPE-CSIC), Blas Valero Garcés (IPE-CSIC), Deborah Verfaillie (METEO-FRANCE), Didier Galop (CNRS), Ernesto Rodríguez (AEMET), Ernesto Tejedor (UNIZAR), Fernando Barreiro-Lostres (IPE-CSIC), Jean-Michel Soubeyroux (METEO-FRANCE), Jordi Cunillera (SMC), José M. Cuadrat (UNIZAR), José María García-Ruiz (IPE-CSIC), Juan Ignacio López-Moreno (IPE-CSIC), Laura Trapero (CENMA), Marc Pons (CENMA), Marc Prohom (SMC), Miguel A. Saz (UNIZAR), Penélope González-Sampérez (IPE-CSIC), Petra Ramos (AEMET), Pilar Amblar (AEMET), Ramón Copons (CENMA), Roberto Serrano-Notivoli (UNIZAR), Simon Gascoin (CESBIO), Yolanda Luna (AEMET).

1.1 El clima del periodo glacial y la deglaciación

Los cambios climáticos durante el Cuaternario (últimos 2,6 millones de años), y en particular la sucesión de periodos glaciales e interglaciales, han tenido importantes repercusiones en los procesos superficiales (modelado del paisaje, geomorfología) y en los ecosistemas pirenaicos, incluyendo la formación de grandes artesas y circos glaciares, depósitos glaciolacustres y formas de detalle. En el Pirineo hay evidencias de glaciaciones anteriores al último máximo glacial global (UMG)¹ que sucedió hace unos 22,000 años, sincrónico al Estadio Isotópico Marino y contemporáneo a la máxima extensión de los casquetes glaciares continentales. Así, en el Valle del Aragón hay depósitos morrénicos y fluvioglaciares de hace 171 ka, y 263 ka (García-Ruiz et al., 2013), en el valle del Gállego de hace 170 ka (Lewis et al., 2009) y en el Valle de Ariège, con avances hacia 79 ka y 35 ka (Delmas et al., 2011).

Aunque la sucesión de periodos fríos y cálidos es sincrónica a escala planetaria, la máxima extensión de los glaciares pirenaicos no sucedió hace 20000 años durante el UMG sino hace unos 60,000 años (Lewis et al., 2009), con ligeras variaciones entre diferentes valles. Esta asincronía se debe a que el clima en los Pirineos ha estado controlado por la interacción existente entre los procesos atmosféricos y oceánicos del Atlántico

Norte, la dinámica atmosférica subtropical, y por los cambios en la radiación solar (insolación) derivados de las variaciones en la órbita de la Tierra (parámetros orbitales) (Bartolomé et al., 2015; González-Sampérez et al., 2017).

Durante el Último Máximo Global (hace entre 22 y 19 ka) los glaciares pirenaicos también experimentaron un crecimiento, aunque es probable que se tratase de un periodo relativamente seco, de manera que no superó la máxima extensión alcanzada entre 30 y 40 ka antes. El comienzo de la última deglaciación, hace unos 19,000 años, se corresponde con un incremento rápido de la temperatura y la humedad, bien documentado en registros glaciares (Palacios et al., 2017), en lagos (Millet et al., 2012; González-Sampérez et al., 2017) y en depósitos en cuevas como espeleotemas (Bartolomé et al., 2015). Los glaciares pirenaicos retrocedieron mucho hasta acantonarse en las áreas de cabecera. La deglaciación fue un periodo de clima inestable, con cambios tanto a escala milenaria como eventos de cambios abruptos causados en última instancia por la inestabilidad de los casquetes glaciares y la dinámica del Atlántico Norte. Tras un periodo inicial relativamente seco y árido, se produjo una nueva expansión de los glaciares hace unos 17,000 años seguida de condiciones más cálidas y húmedas (hace 14700-12900 años), interrumpidas de nuevo por un periodo de vuelta a condiciones casi glaciales durante una fase conocida como Younger Dryas, que conllevó un descenso de la temperatura de casi 2°C en el Pirineo (Bartolomé et al., 2015) y el crecimiento de glaciares de pequeña entidad en ambas vertientes (Pallàs et al., 2010). Este periodo fue el final de la última glaciación y el comienzo del interglacial actual: el Holoceno.

1.1.1 El clima del del Holoceno

El comienzo del Holoceno, hace 11700 años, supuso un cambio sustancial del clima a escala global, con un aumento generalizado de las temperaturas en latitudes medias, asociado al incremento de la insolación durante el verano en el hemisferio norte y a la desaparición de los casquetes glaciares. En la vertiente sur del Pirineo central, el aumento de las precipitaciones asociado

(1) El Último Máximo Glacial (UMG) se define como el periodo en el que los casquetes glaciares continentales tuvieron su máxima extensión en el hemisferio norte. Los estadios isotópicos marinos definen periodos glaciares (números pares) e interglaciares (números impares) basados en la composición isotópica de los fósiles de foraminíferos acumulados en el fondo del mar.

1.1 LA PEQUEÑA EDAD DE HIELO EN LOS PIRINEOS

La Pequeña Edad del Hielo fue la última fase climática a escala global del Holoceno, y sucedió entre ca. 1300 - 1850 CE, antes del calentamiento global actual (Oliva *et al.*, 2018). En nuestras latitudes se caracterizó por temperaturas más frías y un aumento de los fenómenos extremos, aunque con gran variabilidad regional. Tres fases frías en torno a 1650, 1770 y 1850 CE parecen asociadas a mínimos de la actividad solar (mínimos de manchas solares de Maunder, Spörer y Dalton), aunque otros factores como las grandes erupciones volcánicas (Tambora en Indonesia en 1815) también contribuyeron al descenso de las temperaturas. Durante esos siglos, muchos glaciares pirenaicos se reactivaron y avanzaron hasta alcanzar su máxima extensión en todo el Holoceno, de modo que los paisajes y ecosistemas pirenaicos se adaptaron a condiciones más frías antes del Calentamiento Global del siglo XX. Las temperaturas medias, estimadas a partir de las Líneas de Equilibrio Glaciar, fueron unos 0.9°C inferiores a las actuales (López Moreno, 2000)

al comienzo del Holoceno a escala global parece haberse retrasado, produciéndose hace tan sólo 9500 años (Leunda *et al.*, 2017). En general, el clima durante el Holoceno temprano (hasta hace unos 8000 años) fue más cálido y húmedo en el Pirineo que durante la deglaciación, pero probablemente con diferencias entre ambas vertientes y entre las zonas mediterráneas y atlánticas (González-Sampérez *et al.*, 2017). El clima durante el Holoceno temprano estuvo caracterizado por la alta estacionalidad causada por la configuración de los parámetros orbitales lo que provocó un aumento en la acumulación de nieve en las cumbres pirenaicas durante el invierno y unas altas tasas de fusión durante el verano. En la vertiente sur del Pirineo central (secuencia de Basa de la Mora) la inestabilidad climática del Holoceno temprano (entre 9800 y 8100 años) se marca con cuatro eventos rápidos y de corta duración que tuvieron lugar hace 9700, 9300, 8800 y 8300 años.

Desde hace 8100 años aproximadamente y hasta 5700 años, el clima fue más estable y con precipitaciones más abundantes. Tal como sucedió en muchas áreas de montaña del hemisferio norte, seguramente la mayoría de los glaciares pirenaicos desapareció durante el Holoceno temprano, cuando las temperaturas en Europa fueron probablemente las más elevadas de todo el periodo interglacial (Rius *et al.*, 2012; CLIVAR, 2010). Las máximas temperaturas en el Pirineo probablemente ocurrieron a la par que en el resto de Europa entre hace

unos 7000 y 6000 años (Millet *et al.*, 2012).

El progresivo descenso de las precipitaciones durante el Holoceno medio llevó a una transición a condiciones más secas y probablemente más frías entre los 7000 y 5500 años. En los Pirineos hay indicios de que este cambio se produjo antes en las regiones más atlánticas que en la mediterráneas (González-Sampérez *et al.*, 2017; Leunda *et al.*, 2017). En el Pirineo central (Marboré) se han encontrado evidencias de un periodo de avance de los glaciares denominado Neoglacial y que ocurrió entre hace 5100 y 4600 años (García-Ruiz *et al.*, 2016).

1.1.2 Los últimos 2000 años

La variabilidad climática durante los últimos 2000 años ha estado controlada principalmente por las interacciones entre los procesos atmosféricos (NAO, Oscilación del Atlántico Norte y EA, Oscilación del Atlántico Oriental y SCAN, Oscilación de Escandinavia), la insolación y el vulcanismo (Giralt *et al.*, 2017). Estas interacciones pueden explicar además los gradientes regionales y temporales de humedad y temperatura. En los dos últimos milenios han tenido lugar cuatro fases climáticas bien caracterizadas a escala global: el Periodo Cálido y Húmedo Ibero-Romano (desde 250 años antes de nuestra, CE, hasta el año 500 CE), la Baja Edad Media (o “Edades Oscuras”, conocidas por su nombre en inglés, Dark Ages: 500-900 CE), la Anomalía Climática Medieval (ACM ó MCA por sus siglas en inglés, Medieval Climate Anomaly: 900-1300 CE) y la Pequeña Edad de Hielo (PEH ó LIA, del inglés “Little Ice Age”: 1300-1850 CE). Tanto la intensidad como la cronología de estas fases, muestra una gran variabilidad en la Península Ibérica (Cisneros *et al.*, 2016; Moreno *et al.*, 2012; Giralt *et al.*, 2017).

Durante el Periodo Ibero-Romano, en los Pirineos se detecta una tendencia al aumento de la temperatura tanto en altitudes altas (Pla y Catalán, 2011), como medias (Morellón *et al.*, 2012). En cuanto a la humedad, en los Pirineos se dan condiciones más áridas que en el sur de la península Ibérica (Morellón *et al.*, 2012). Durante la Baja Edad Media, las temperaturas medias descendieron, aunque las condiciones de humedad mantuvieron una gran variabilidad regional, caracterizadas en general por la mayor aridez en el Mediterráneo (Menorca, Cisneros *et al.*, 2016) y en el Pirineo (Morellón *et al.*, 2012). No obstante, algunos registros pirenaicos sugieren un aumento de las precipitaciones o de los eventos extremos (tormentas) (Corella *et al.*, 2016). La ACM podría servir como un análogo del presente periodo de Calentamiento Global y podría evaluar la variabilidad natural del clima antes del gran impacto humano que está ocurriendo

1.1. El clima del periodo glacial y deglaciación

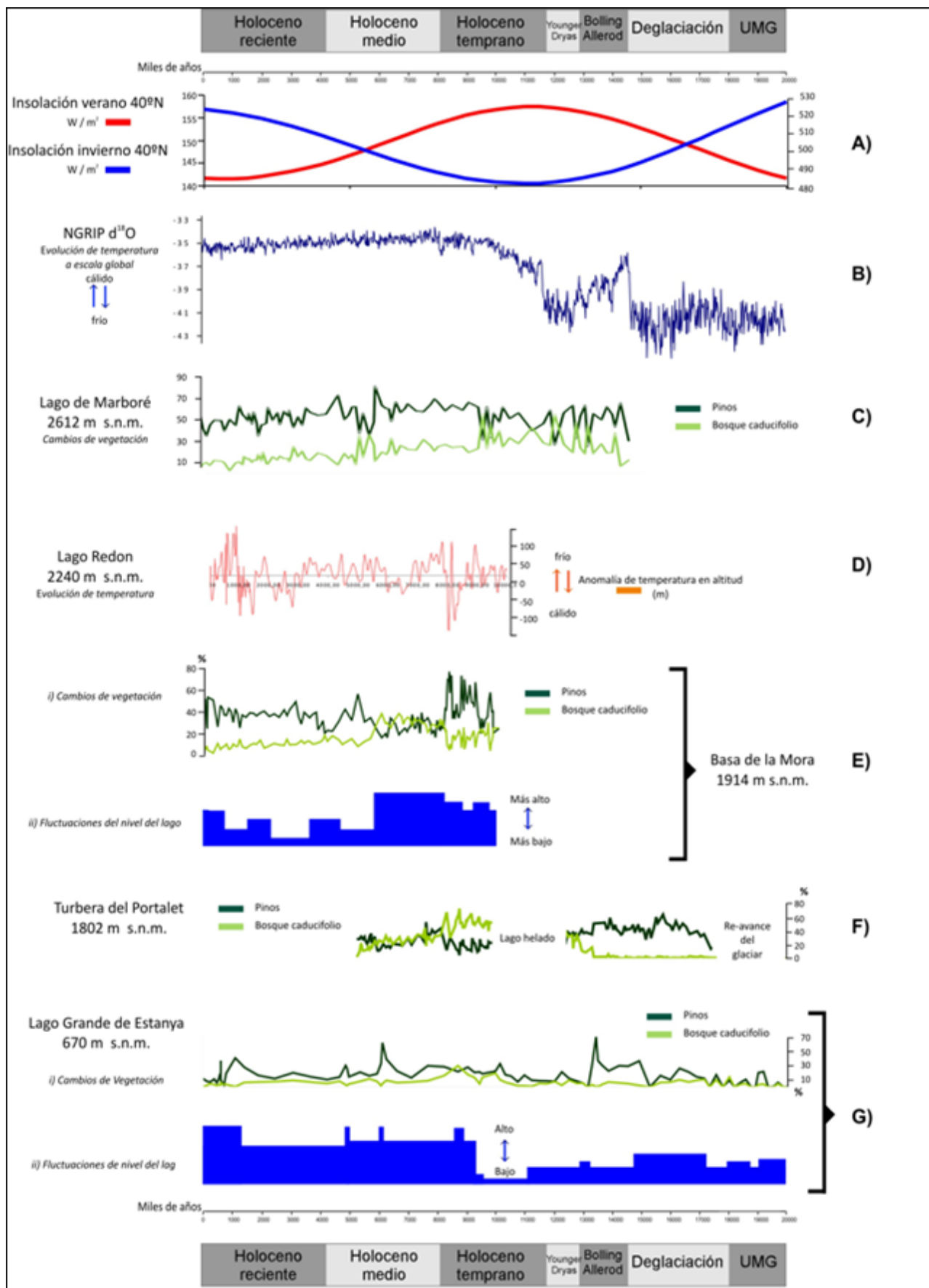


Figura 1.1.1 Registros pirenaicos de variabilidad climática desde el último máximo glacial. Las curvas y escala temporal están organizadas en miles de años, siendo lo más antiguo lo que está a la derecha de la figura y el presente a la izquierda. La barra inicial y final incluye los principales periodos climáticos reconocidos para los últimos 20.000 años y sus límites cronológicos (las siglas UMG corresponden a "último máximo glacial"). Las curvas están ordenadas por altitud y comenzando en la parte superior por las que representan indicadores de escala global (orbital y planetaria). Corresponde, de arriba hacia abajo: A) evolución de la insolación (cantidad de energía que llega a la Tierra desde el Sol), en verano (rojo) e invierno (azul), a 40° latitud Norte; B) evolución de temperatura a escala global reconstruida a partir de isótopos de oxígeno del sondeo de hielo NGRIP de Groenlandia (los valores más negativos implican temperaturas más bajas y corresponden al periodo glacial); C) Cambios de vegetación arbórea dominante basados en la proporción de granos de polen de pino (verde oscuro) y de especies típicas de bosque caducifolio (abedul, avellano, roble, fresno, olmo, tilo, etc., en verde claro) del sondeo del lago de Marboré D) reconstrucción de la anomalía de temperatura de invierno-primavera durante los últimos 10.000 años en cotas altas de los Pirineos centrales a partir del registro de crisofíceas del lago Redón; E) Cambios de vegetación arbórea dominante (polen de pinos en verde oscuro y de bosque caducifolio en verde claro) y fluctuaciones del nivel del lago reconstruidos a partir del registro sedimentario de la Basa de la Mora; F) Cambios de vegetación arbórea dominante (polen de pino, verde oscuro y de especies típicas de bosque caducifolio, verde claro) de la turbera de El Portalet y G) Cambios de vegetación arbórea dominante (polen de pinos en verde oscuro y de bosque caducifolio en verde claro) y fluctuaciones del nivel del lago reconstruidos a partir del registro sedimentario del Lago Grande de Estanya. Todas las referencias detalladas de cada una de estas secuencias y los indicadores incluidos pueden encontrarse en González-Sampérez et al., (2017).

durante el Antropoceno. Este periodo muestra, en la zona mediterránea de la Península Ibérica, un acentuado carácter árido y cálido (Moreno *et al.*, 2012). Hacia el norte, las condiciones fueron secas (Morellón *et al.*, 2012), aunque en algunos lugares de alta montaña como los Pirineos, se han documentado fases húmedas (Pla y Catalán, 2011), además de una mayor frecuencia de tormentas incluso en altitudes medias (Corella *et al.*, 2016).

La PEH (1300 – 1850 CE) fue un periodo más frío que comenzó acompañado por un aumento en la frecuencia de tormentas (Corella *et al.*, 2016) y está caracterizado por fases más húmedas alternadas con otras de intensa sequía, mostrando una gran variabilidad en las zonas de montañas de la Península (Morellón *et al.*, 2012; Oliva *et al.*, 2017). Las fases más frías (1645-1706, 1796-1830 y 1810-1838 CE) coinciden con algunos periodos de reducción de manchas solares (menor radiación solar). Por otro lado también tuvieron lugar periodos más cálidos, ocurridos entre 1626-1637, 1800-1809 y 1845-1859 CE. Algunos registros sugieren que el periodo más húmedo, al menos en altitudes medias, fue durante el siglo XIX (Morellón *et al.*, 2012). Las reconstrucciones basadas en anillos de árboles (dendroclimatológica) muestran que el siglo XVIII se caracterizó por una alta frecuencia de eventos extremos, que disminuyó durante el siglo XIX (Oliva *et al.*, 2018). En este momento, con un descenso de la temperatura media de casi 1°C, los glaciares pirenaicos avanzaron en ambas vertientes (López-Moreno, 2000).

1.2 UN CALENTAMIENTO GLOBAL RECIENTE INUSUAL

La variabilidad climática durante el Cuaternario ha esculpido el territorio pirenaico y controlado la evolución de sus ecosistemas. Durante la deglaciación, los cambios en temperatura media fueron de hasta 6°C, con periodos de cambio climático rápido de más de 1 oC en unas pocas décadas (Informe CLIVAR, 2010).

Durante el Holoceno, los cambios de las temperaturas fueron menores, pero se ha registrado la alternancia de numerosas fases húmedas/secas. En el último milenio, se produjo una fase particularmente seca y cálida (ACM, 900 -1300 CE) seguida de la PEH, última fase fría (1300- 1850 CE) antes del calentamiento global que estamos viviendo en nuestros días. La tasa de aumento de temperatura durante el calentamiento global del siglo XX es superior a la de las transiciones glacial/interglacial y a los cambios vividos durante el Holoceno.

1.2 El clima actual

La disponibilidad actual de información meteorológica instrumental permite una mayor aproximación al conocimiento del clima de los Pirineos y a la evaluación del impacto del cambio climático. No obstante, el estudio es complejo en áreas montañosas, pues la topografía genera una gran diversidad de ambientes locales, en los que el valor de las variables climáticas es difícil de determinar. A ello se une la falta de datos con series largas y la disminución del número de observatorios con la altitud, siendo muy pocas las estaciones localizadas en cotas elevadas. Por esta razón, la comprensión de lo que ocurre por encima de un determinado umbral resulta muy complicada, pese a la importancia de la información climática en alta montaña tanto desde un punto de vista científico como aplicado, ya que algunas de las actividades humanas y numerosos procesos ecológicos se concentran en estas zonas.

En la vertiente francesa el interés por la observación meteorológica se manifiesta desde finales del siglo XVIII con el registro de mediciones en Mont-Louis, a 1600 m de altitud; más tarde con la creación del Observatorio du Pic du Midi, el año 1880, a 2880 m; y posteriormente con nuevos observatorios a lo largo del siglo XX. Pero hasta el desarrollo de las redes automatizadas, en la década de 1990, las mediciones son irregulares y escasas por encima de los 1500 m. En el lado español la situación es muy similar. El establecimiento reciente de estaciones automáticas y de una red climatológica apoyada en las observaciones de refugios de montaña constituyen una valiosa base de datos para el estudio de la evolución de los cambios climáticos, pero la longitud temporal reduce el alcance del diagnóstico. Para minimizar este problema, se requiere disponer de más observatorios, impulsar actuaciones de rescate de datos y asegurar la pervivencia de las observaciones ya existentes, así como de su buena calidad. En este sentido, es destacable el ejemplo de la cordillera de los Alpes, donde a partir del proyecto HISTALP se trabaja desde hace años en la recuperación de series climatológicas (Böhm *et al.*, 2009).

A pesar de estas limitaciones, existen numerosos estudios del clima de los Pirineos, en particular sobre las precipitaciones y temperaturas (entre otros, los trabajos de Balseinte, 1966; Creus, 1983; Gottardi, 2009; Pérez Zanón *et al.*, 2017), también de la nieve (Esteban *et al.*, 2005; López Moreno, 2005 y 2009; Durand *et al.*, 2012), el clima y las actividades de ocio (Pons *et al.*, 2012 y 2015; Gilaberte *et al.*, 2014), la variabilidad y el cambio climático (Bücher y Dessens, 1991; Vicente Serrano *et al.*, 2007; López Moreno y Vicente Serrano, 2007; Espejo *et al.*, 2008; López

Moreno *et al.*, 2011; Esteban *et al.*, 2012; Buisán *et al.*, 2015) y las proyecciones climáticas (López Moreno *et al.*, 2011; Verfaillie *et al.*, 2017 y 2018). Sin embargo, la mayoría de los trabajos presenta conclusiones limitadas por su aproximación únicamente regional, francesa, andorrana o española; es decir, considerando tan solo una vertiente de los Pirineos, lo cual no permite la comprensión global de los procesos climáticos a escala del conjunto de la cordillera. Las acciones desarrolladas por el Observatorio Pirenaico del Cambio Climático han permitido superar estas limitaciones, además de optimizar la utilización de las fuentes de información y consolidar una mayor aproximación interdisciplinar. Un paso fundamental ha sido la creación de una primera base de datos única, con control de calidad y homogeneizada, del periodo 1950-2010, y utilizar una metodología común para caracterizar el clima pirenaico y observar su variabilidad. Con esta información, generada en el marco del OPCC, se están realizando las primeras aproximaciones al conocimiento de los patrones temporales y espaciales de las temperaturas y precipitaciones del conjunto de los Pirineos, y el análisis de sus tendencias (Soubeyroux *et al.*, 2011; Miquel, 2012; Cuadrat *et al.*, 2013; Deaux *et al.*, 2014).

1.2.1 Evolución de la temperatura media anual y estacional

Tanto los estudios regionales sobre Andorra, España y Francia, como los generales del conjunto de la cordillera, indican un claro aumento de las temperaturas en cualquier momento del año (Spagnoli *et al.*, 2002; Maris *et al.*, 2009; López Moreno *et al.*, 2010; El-Kenawy *et al.*, 2011; Esteban *et al.*, 2012); además, este ascenso ha sido regular y cada vez más marcado en las últimas tres décadas, en consonancia con el diagnóstico global que realiza el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 2013).

En Andorra, la estimación de la tendencia realizada a partir de la información de tres observatorios indica, para el periodo 1935-2008, el aumento significativo de la temperatura máxima media anual (0,13 a 0,15 °C / década), la máxima estival (0,22 °C / década) y la mínima estival (0,11 °C / década). Dichas tendencias al incremento térmico se refuerzan cuando el análisis se centra en el subperiodo 1950-2008 (Esteban *et al.*, 2012). En el Pirineo central español Pérez Zanón *et al.* (2017) han encontrado anomalías regionales de 0,11 °C / década para las temperaturas máximas y de 0,06 °C / década para las mínimas para el periodo 1910-2013, que aumentarían hasta 0,57 y 0,23 °C / década en el periodo 1970-2013 respectivamente. Estos valores son en parte coincidentes con los observados en la vertiente francesa: Deaux *et al.* (2014), para la serie

de Tarbes-Ossun, indican un calentamiento de las temperaturas medias de 0,25 a 0,36 °C / década, con un rango de incertidumbre de 0,15 a 0,48 °C / década, según el periodo de tiempo considerado; e indican también que la señal de aumento es especialmente fuerte desde la década de 1980, al igual que ocurre en otros observatorios pirenaicos.

Cuando el análisis se realiza para el conjunto de los Pirineos, el resultado es idéntico: en las últimas décadas la temperatura ha experimentado un claro aumento. Esta es la conclusión de la investigación desarrollada en la acción Clima del proyecto OPCC-POCTEFA EFA 235/11, a partir del estudio de 32 series de temperaturas de alta calidad y homogeneizadas para el periodo 1959-2010. La tendencia del indicador de temperatura media anual para el global del periodo analizado es positiva y estadísticamente significativa, siendo su valor del orden de 0,2 °C por década. Este aumento térmico es general en toda la cordillera, con anomalías sistemáticamente positivas desde 1980 hasta la actualidad, y con pocas diferencias entre la vertiente norte y la vertiente sur de la misma.

De toda la serie considerada, 1959-2010, el año más cálido fue 1997, con una temperatura media superior en 1,5 °C al valor promedio de 1961-1990, seguido de los años 2006 y 2003. En sentido contrario, 1972 fue el

más frío, siendo 0,8 °C inferior a la media de referencia, seguido de los años 1963 y 1980. El indicador de temperatura media para las cuatro estaciones muestra que el aumento térmico a lo largo de las últimas cinco décadas es muy marcado en verano: del orden de 0,4 °C por década, valor que supera los umbrales estadísticos de significación. En primavera es algo más bajo: del orden de 0,2 °C por década; también estadísticamente significativo. La anomalía estacional en otoño e invierno es bastante menor y, además, la tendencia no es estadísticamente significativa en estas dos estaciones, de modo que su valor está sujeto a un mayor grado de incertidumbre. A escala estacional también se observan pocas diferencias en este indicador entre la vertiente norte y la vertiente sur de los Pirineos.

Del análisis de eventos concretos se observa que entre las anomalías cálidas (positivas) destaca especialmente la temperatura media del verano de 2003, con valores 3,6 °C por encima de la media de 1961-1990 (en el contexto de una notable ola de calor que afectó a buena parte del continente europeo) y la del invierno de 1990, con 2,8 °C por encima de la media. En sentido contrario, las anomalías frías (negativas) más importantes son la del invierno de 1963, que se situó -2,5 °C por debajo de la media, y la del otoño de 1974, con una anomalía de -2,2 °C.

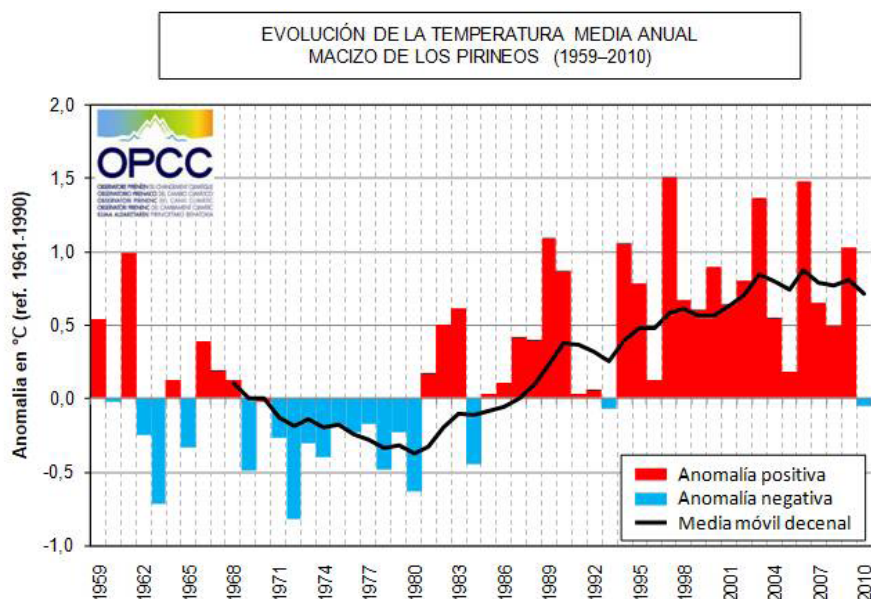


Figura 1.2.1 Evolución de la temperatura media anual en el conjunto de los Pirineos durante el periodo 1959-2010. Se muestra la anomalía anual respecto al valor medio del periodo de referencia 1961-1990 (en rojo, positiva; en azul, negativa) y la evolución de la media móvil para un periodo de 10 años (línea negra). Fuente: OPCC, 2013

EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA MEDIA ESTACIONAL
MACIZO DE LOS PIRINEOS (1959–2010)

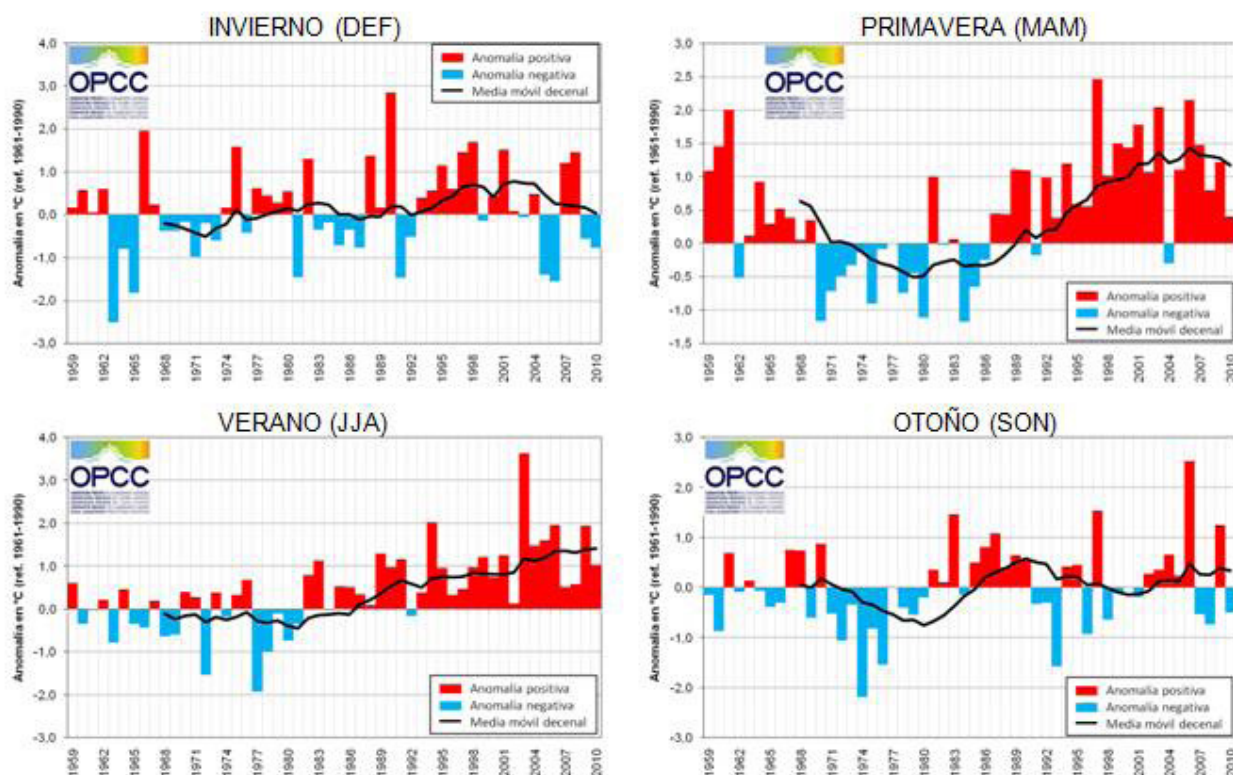


Figura 1.2.2 Evolución de la temperatura media estacional en el conjunto de los Pirineos durante el periodo 1959-2010. Se muestra la anomalía estacional respecto al valor medio del periodo de referencia 1961-1990 (en rojo, positiva; en azul, negativa) y la evolución de la media móvil para un periodo de 10 años (línea negra). Fuente: OPCC, 2013

La tendencia al calentamiento parece que se mantendrá a lo largo del siglo XXI y a escala temporal anual podría oscilar entre los 2,8 y 4 °C, según los peores escenarios; además, los efectos del cambio climático serán más pronunciados en la vertiente meridional de la cordillera y en las zonas costeras (López Moreno *et al.*, 2008). No obstante, hay que reconocer que nuestra capacidad para estimar con la precisión adecuada los posibles cambios futuros es muy limitada.

1.2.2 Evolución de la precipitación anual y estacional

Los patrones temporales y espaciales de la precipitación muestran una cierta tendencia a la disminución de los totales pluviométricos, y en particular al descenso en la frecuencia de los eventos de mayor intensidad y la mayor frecuencia de rachas secas de larga duración. Sin embargo, la elevada

diversidad espacial de la región pirenaica obliga a tomar estos patrones de cambio con reservas, ya que la modificación que introduce el relieve en la circulación atmosférica puede resultar muy relevante.

Así parece observarse en Andorra, donde Esteban *et al* (2012) confirman tendencias decrecientes y estadísticamente significativas para el periodo 1935-2008, e incluso se generaliza y refuerza entre 1950-2008. En cambio, en los índices de precipitación no se detecta ninguno con tendencia significativa para el periodo 1935-2008, mientras que varios de ellos sí que presentan valores decrecientes con significación estadística para el sub-periodo 1950-2008. En el sector central de los Pirineos españoles Pérez Zanón *et al* (2016) observan una importante variabilidad interanual, sin tendencia significativa, con alguna diferencia entre el comportamiento estacional. El porcentaje de años con precipitaciones anuales normales disminuye

en el período 1950-2013 respecto al período 1910-1949, aumentando al mismo tiempo los años secos y húmedos. El descenso mayor se observa en invierno, en torno a 2.25% por década, lo que coincide con las investigaciones de López Moreno *et al* (2005), quien identificó una disminución notable de la capa de nieve para el período 1950-1999. En cambio, se detecta un aumento en otoño de 2.25 % por década.

La disminución de las lluvias se observa igualmente en los Pirineos españoles a lo largo de la segunda mitad del siglo XX, tanto en el volumen total como en el número de días de precipitación, rachas secas y precipitaciones extremas: en el sector central se comprueba que la disminución es mayor en primavera y verano; en otoño son escasos los observatorios que muestran tendencias significativas, y en invierno se constata un evidente descenso, aunque con marcados contrastes espaciales (Vicente Serrano *et al.*, 2007). En el Pirineo y Prepirineo oriental parece también evidente el descenso de la precipitación anual desde 1950, con una tendencia estadísticamente significativa entre el 3 y 5 % por decenio; y de hasta el 8% por decenio en verano (BAIC, 2018).

Estos análisis son en buena parte coincidentes con los resultados del estudio de la acción Clima del OPCC, para el conjunto los Pirineos, con los datos de 101 series, para el periodo 1959-2010. En los últimos 50 años el descenso de la pluviometría anual es del orden del 2,5% por década. El valor es estadísticamente significativo, pero presenta gran variabilidad interanual: durante las últimas dos o tres décadas han predominado los años secos, con cantidades anuales de precipitación bastante inferiores a la media del período de referencia, seguidos de varios años lluviosos, que destacan sobre el dato promedio. En cuanto a diferencias espaciales, la disminución de la precipitación anual es mayor en la vertiente sur que en la vertiente norte, aunque los contrastes no son importantes. Años particularmente lluviosos de la serie analizada fueron 1992 (con una media 23.2% superior a la del periodo de referencia 1961-1990), así como los años 1979 y 1996; mientras que los años más secos de las últimas cinco décadas son 1989 (un 23.1% inferior a la media de referencia), 1985 y 1983. El indicador para las cuatro estaciones del año no tiene un comportamiento claro, aunque en todas ellas se observa una ligera disminución, algo más marcada en invierno y verano. Conviene destacar que las tendencias estacionales no son estadísticamente significativas, de manera que a esta escala temporal no se pueden deducir conclusiones muy sólidas. Una gran variabilidad interanual se observa en todas las estaciones del año, intercalando periodos secos con estaciones lluviosas; si bien durante las dos últimas décadas predominan las rachas de periodos secos,

como fueron los inviernos de los periodos 1989-1993 y 2005-2008. No obstante, y con la prudencia necesaria para la interpretación de los resultados, este patrón general de descenso pluviométrico se puede poner en relación con comportamientos similares observados en otras regiones del área mediterránea.

Esta tendencia parece que va a continuar en los próximos años según reflejan los modelos de cambio climático. Las predicciones para los Pirineos muestran un acusado descenso de las precipitaciones a lo largo del siglo XXI, con un descenso en la frecuencia de días lluvioso, un aumento de la intensidad de los fenómenos más extremos y un notable aumento en la duración de las rachas secas (Vicente Serrano *et al.*, 2007). No obstante, hay que tener en cuenta que la resolución espacial de los actuales modelos no permite representar toda la diversidad climática que caracteriza a los Pirineos como consecuencia de su diversidad topográfica, sus importantes gradientes altitudinales y su interacción con la circulación atmosférica, por lo que los resultados de dichas predicciones para áreas de montaña tan complejas debe tomarse con reservas.

1.2.3 Evolución del manto de nieve en los Pirineos

Las limitaciones mencionadas en cuanto a la información climática disponible en zonas de alta montaña se hacen aún más patentes cuando nos referimos a la existencia de registros con longitud y calidad suficiente para analizar la evolución del manto de nieve en los Pirineos durante las últimas décadas. Este hecho explica la ausencia de una valoración de las tendencias del manto de nieve para el conjunto de la cordillera. Hasta la fecha, la única información disponible se basa en unas series sintéticas generadas a partir de una relación estadística robusta entre los datos de espesor de nieve en una red de balizas donde se mide el manto en la vertiente sur del Pirineo central y las series climáticas de la zona. De ellas se pudo inferir un descenso estadísticamente significativo del manto de nieve en este sector para el periodo 1950-2000 (López-Moreno, 2005). Dicho descenso se confirmó para el periodo 1950-2010 (figura 1.2.5) en un estudio posterior (García-Ruiz *et al.*, 2011), siendo este descenso también corroborado por una pérdida significativa de la señal nival en el régimen de los ríos de la vertiente sur del Pirineo (Morán-Tejeda *et al.*, 2013, Sanmiguel-Valladolid, 2017). La disminución de la precipitación en los meses invernales parece la causa principal de la reducción del manto de nieve. Sin embargo, estas tendencias aparecen superpuestas a una elevada variabilidad interanual, que se explica por las fuertes oscilaciones que la temperatura y la precipitación

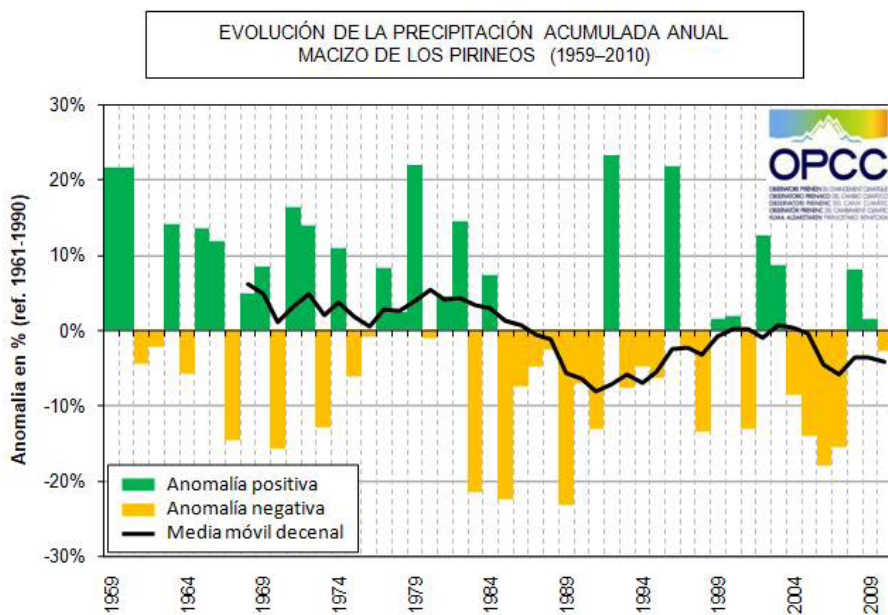


Figura 1.2.3. Evolución de la precipitación anual en el conjunto de los Pirineos durante el período 1959-2010. Se muestra la anomalía anual respecto al valor medio del período de referencia 1961-1990 (en verde si es positiva, en amarillo si es negativa) y la evolución de la media móvil para un período de 10 años (línea negra). Fuente: OPCC, 2013

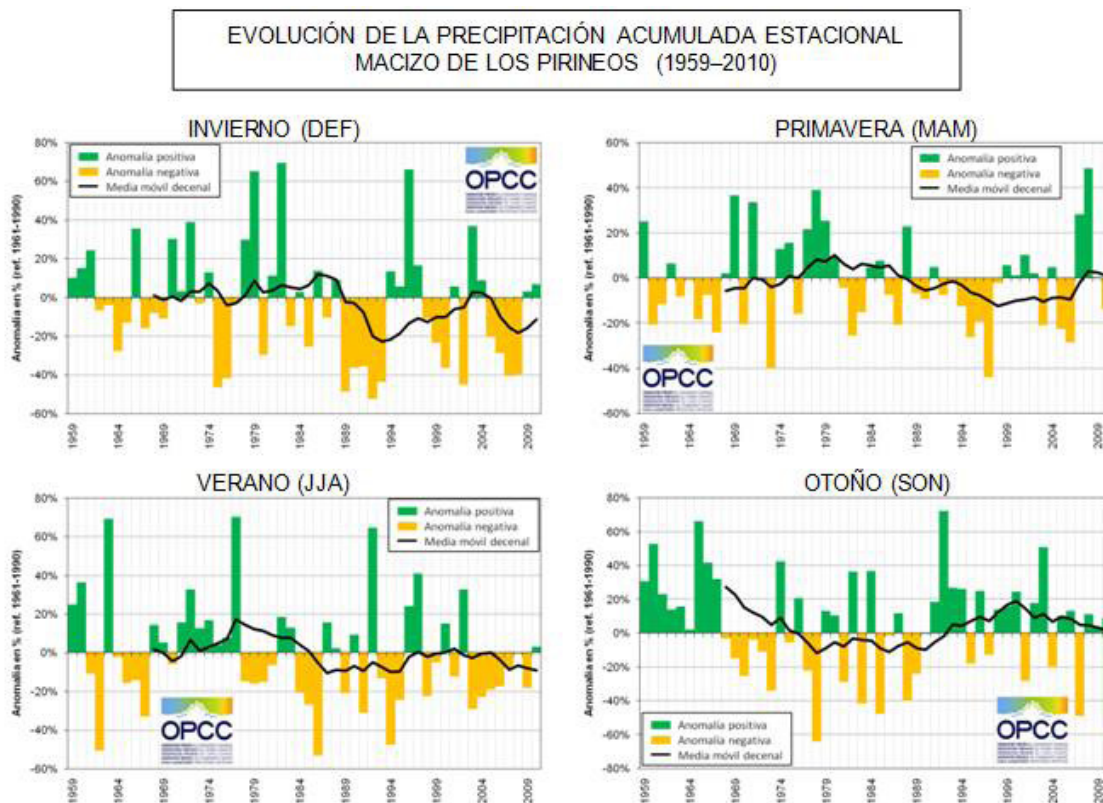


Figura 1.2.4. Evolución de la precipitación estacional en el conjunto de los Pirineos durante el período 1959-2010. Se muestra la anomalía estacional respecto al valor medio del período de referencia 1961-1990 (en verde si es positiva, en amarillo si es negativa) y la evolución de la media móvil para un período de 10 años (línea negra). OPCC, 2013

muestran en el tiempo. Dicha variabilidad se interpreta fundamentalmente por la frecuencia anual de los distintos tipos de tiempo en el sudoeste europeo durante los meses de invierno, controlados en gran medida por la Oscilación del Atlántico Norte (NAO, López-Moreno *et al.*, 2011). Así, una mayor abundancia de nieve en la vertiente sur del Pirineo central ha sido asociada con una mayor frecuencia de flujos del oeste, suroeste y noroeste que se produce fundamentalmente con años en el que el índice NAO es negativo (López-Moreno y Vicente-Serrano, 2006, Buisán *et al.*, 2015). Si bien el índice NAO ha mostrado una tendencia positiva en el largo plazo, tiene una marcada variabilidad decadal (Vicente-Serrano y López-Moreno, 2008), lo cual explica que en las últimas décadas hayan sido frecuentes importantes anomalías negativas, trayendo a la cordillera pirenaica una importante innivación, especialmente en cotas altas. De hecho, cuando se analizan series de nieve de las últimas dos décadas, la mayor parte de los observatorios no muestran tendencia estadísticamente significativa, e incluso una leve tendencia al incremento (Buisán *et al.*, 2015). A pesar de que no se dispone de estudios específicos para la vertiente francesa, la existencia de tendencias comunes en la precipitación y la temperatura en las dos vertientes sugieren que en ella también se ha producido un descenso en la acumulación de nieve si se considera el largo plazo, pero con una señal muy variable durante las últimas dos décadas.

IDEAS CLAVE

- En el conjunto de los Pirineos la temperatura media anual ha mostrado un claro incremento, calculado en torno a 0,2 oC por década, con pocas diferencias entre ambas vertientes de la cordillera.
- El aumento es muy claro a partir de los años ochenta, siendo la última década la más cálida desde que existen registros instrumentales.
- A escala estacional, el ascenso más significativo se ha dado en verano, del orden de 0,4 oC por década; ha sido algo menor en primavera, cercano a 0,2 oC; con incrementos más moderados en otoño e invierno.
- Se observa una tendencia de disminución de los volúmenes anuales de las precipitaciones, debido al descenso detectado de los totales de invierno y verano, aunque no hay una tendencia bien definida. Existen diferencias espaciales significativas y la variabilidad interanual adquiere magnitudes similares e incluso superiores en ocasiones a las observadas en las fases más álgidas de la Pequeña Edad del Hielo.
- En gran medida, estos resultados son coincidentes con los observados en regiones vecinas y con la tendencia general del clima en la Europa mediterránea.

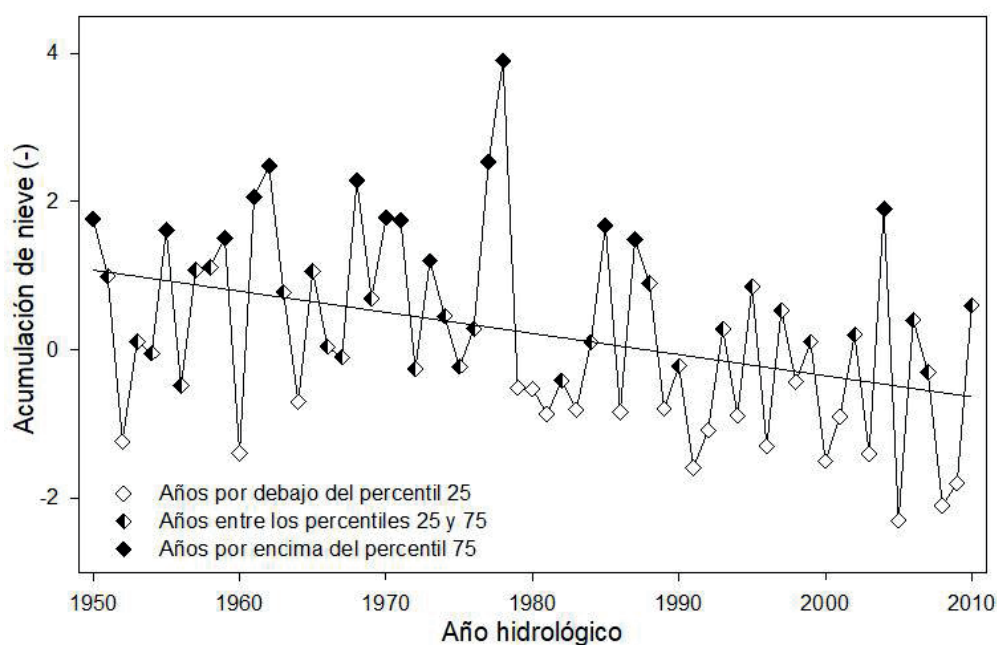


Figura 1.2.5. Evolución del manto de nieve en el mes de abril simulado a partir de la relación entre temperatura y precipitación invernal y la acumulación de nieve en una red de balizas de la vertiente sur de los Pirineos. Fuente: OPCC, 2013

1.3 Proyecciones de cambio climático en los Pirineos

El estudio del sistema climático y de su evolución futura se realiza normalmente a través del uso de modelos climáticos. Estos modelos son representaciones numéricas del sistema climático basadas en las propiedades físicas, químicas y biológicas de sus componentes, en sus interacciones y en sus procesos de realimentación. Cuando estos modelos abarcan todo el sistema se habla de modelos climáticos globales. Sin embargo, estos modelos no tienen actualmente la resolución necesaria para determinados estudios siendo conveniente la utilización de métodos de regionalización. Estos métodos se suelen agrupar en dos grandes grupos: los métodos dinámicos y los métodos estadísticos. Entre los primeros se encuentran los modelos regionales, los cuales son modelos climáticos pero aplicados a una región determinada.

Entre las causas que pueden inducir un cambio en el clima se encuentran la alteración de la composición de la atmósfera global, existiendo evidencias de que se está produciendo debido a la actividad humana. Para incorporar los posibles efectos de estas alteraciones en los modelos climáticos la comunidad científica ha definido un grupo de escenarios denominados Trayectorias de Concentración Representativas (Representative Concentration Pathways, RCP). Estos escenarios se centran en las emisiones antropogénicas, y representan el forzamiento radiativo total calculado para el año 2100 respecto al año 1750 (por ejemplo, el RCP 2.6 significa 2,6 W/m²). Se basan en una combinación de modelos de evaluación integrados, modelos climáticos simples, modelos de química de la atmósfera y modelos de ciclo de carbono; y además, pueden contemplar variedad de políticas climáticas, es decir, cada RCP puede ser resultado de diferentes combinaciones de futuros económicos, tecnológicos, demográficos y políticos. Las simulaciones que se obtienen bajo estos escenarios constituyen las denominadas proyecciones climáticas (IPCC, 2013). En la región pirenaica las proyecciones se están realizando siguiendo dos metodologías complementarias que se apoyan en algoritmos dinámicos y estadísticos, y en la generación de análisis de referencia de las temperaturas y la precipitación diarias con una alta resolución horizontal (rejilla de 5km) (Peral *et al.*, 2017) y vertical (reanálisis SAFRAN por alturas de 300 m) (Verfaillie *et al.*, 2017). Las proyecciones se han obtenido a partir de las salidas de un conjunto de modelos climáticos globales (GCM) del CMIP5 (19 modelos), y de combinaciones con modelos climáticos regionales

(RCM) de Euro-Cordex (13 combinaciones GCM/RCM), considerando cuatro escenarios de emisiones (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5). Este conjunto de proyecciones permite realizar una exploración de las incertidumbres asociadas a los escenarios de emisiones, modelos climáticos y técnicas de regionalización. A partir de una evaluación preliminar de estas proyecciones, una primera aproximación probabilística de predicción de clima futuro ofrece estos resultados:

- Las temperaturas máximas y mínimas diarias aumentarán a lo largo del siglo XXI bajo las tres RCP analizadas (RCP8.5, RCP6.0 y RCP4.5) (figura 1.3.1 a-b), en todas las estaciones del año y en toda la zona pirenaica. Este aumento será más rápido para la RCP8.5, asociada a escenarios más emisivos a lo largo de este siglo.
- Las incertidumbres asociadas a las RCP y a los modelos climáticos globales para las temperaturas van aumentando a lo largo del siglo, apreciándose tanto una separación entre las líneas de evolución (entre RCP) como en el incremento de las zonas sombreadas (entre modelos climáticos globales).
- En cuanto a la evolución de las precipitaciones futuras, bajo los escenarios analizados y metodología empleada, no se obtienen cambios significativos a lo largo del siglo XXI, apreciándose poca influencia de éstos sobre su evolución (figura 1.3.1c). El número de modelos que indican aumentos en las precipitaciones medias es similar al número de modelos que muestran descenso de las mismas. Las incertidumbres van aumentando a lo largo del siglo, sobre todo en el caso de la RCP 8.5.

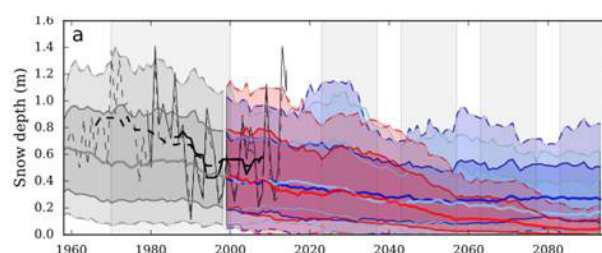


Figura 1.3.2 Evolución de la distribución estadística del espesor medio de nieve en el Pirineo Central (alt 1800m) a partir de las simulaciones hacia el pasado (gris) y del reanálisis Safran (línea gris), para el futuro del ensemble Euro-Cordex con los RCP 2.6 (azul), RCP 4.5 (rosa) y RCP 8.5 (rojo). Fuente: Météo-France

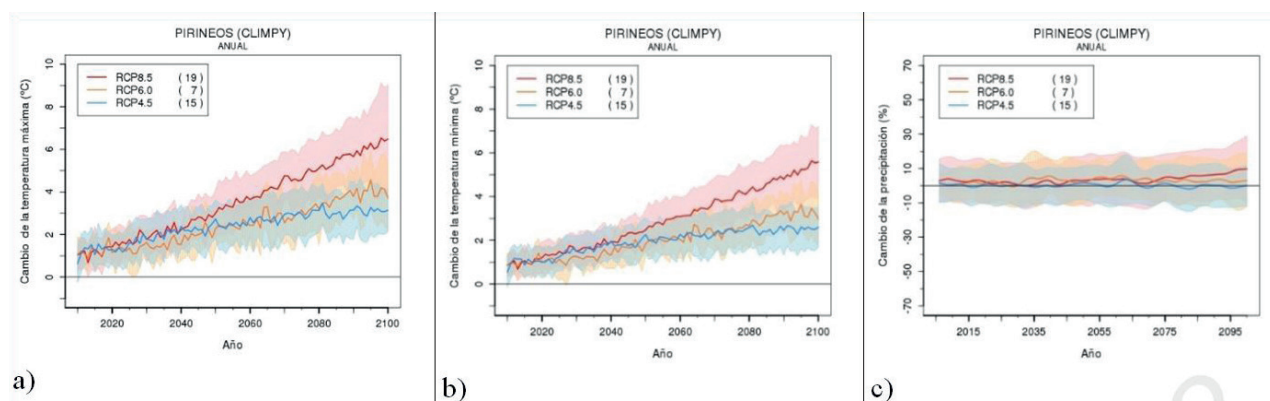


Figura 1.3.1 Evolución de la anomalía media anual de (a) temperatura máxima, (b) temperatura mínima y (c) precipitación promediadas para la región pirenaica

Tomando ventanas de 15 años centradas en 2030, 2050 y 2090 y estimando la incertidumbre ligada a los modelos a través de los percentiles 17 y 83 se obtiene:

- Para el horizonte 2030, el cambio del valor medio anual de las temperaturas máximas respecto al periodo de referencia (1961-1990) podría estar, en promedio y para la zona pirenaica, entre 1 °C y 2.7 °C para la RCP8.5 (valores muy similares se obtienen para las otras RCP). Aumentos parecidos o ligeramente más bajos se obtienen para las temperaturas mínimas (entre 0.9 °C y 2.2 °C para la RCP8.5).
- Para el horizonte 2050, el calentamiento sería algo mayor, con un desplazamiento de las horquillas de valores hacia valores más altos a la vez que éstas tienden a ampliarse ligeramente. Así, para la temperatura máxima, las horquillas irían de 2.0 °C a 4.0 °C y de 1.4 °C a 3.3 °C para las RCP8.5 y RCP4.5 respectivamente, mientras que, para la temperatura mínima, serían de 1.7 °C a 3.3 °C; y de 1.2 °C a 2.8 °C. El aumento de la temperatura mínima continúa siendo ligeramente menor que el de la temperatura máxima.
- Para finales de siglo, los rangos de valores se amplían más, así como la magnitud de los cambios, y la separación entre las evoluciones asociadas a las RCP es más clara. Para la temperatura máxima y para la RCP8.5, en promedio, su cambio anual estaría entre 4.3 °C y 7.1 °C, mientras que para la RCP4.5, oscilaría entre 1.9 °C y 4.2 °C. Para la temperatura mínima, los intervalos correspondientes se situarían entre 3.6 °C y 6.0 °C, en el primer caso, y 1.6 °C y 3.5 °C, en el segundo.

IDEAS CLAVE

- Las proyecciones futuras del clima en la zona pirenaica muestran un aumento progresivo tanto de las temperaturas máximas como de las temperaturas mínimas a lo largo del siglo XXI. Este aumento será más rápido en los escenarios más emisivos.
- Este calentamiento también incidirá en una disminución tanto del espesor de la nieve como en la longitud del periodo en que la nieve cubre el suelo.
- Para el caso de la precipitación, el acuerdo entre las proyecciones es menor que para la temperatura y no puede apreciarse cambios significativos.

Las proyecciones del cambio climático para la nieve se pueden realizar a partir de estos escenarios climáticos y permiten caracterizar su evolución futura respecto al clima actual (Verfaillie *et al.*, 2018). Los primeros resultados para los Pirineos indican un descenso significativo del espesor de nieve a pesar del mantenimiento de la fuerte variabilidad interanual. Así, en el Pirineo Central, a la altura de 1800 m (Figura 1.3.2), el espesor medio de nieve podría disminuir a la mitad en el horizonte del 2050 según la referencia actual, mientras que el periodo de permanencia de la nieve en el suelo se reduciría en más de un mes, compartido entre el otoño y la primavera lo largo de la estación fría.

2. El Impacto del CC en los sectores biofísicos

Coordinadores: Blas Valero-Garcés (IPE-CSIC)

Autores: David Amouroux (U. Pau- Pays de L'Adour), Laure Gandois (Laboratoire EcoLab, CNRS, UPS, INPT), Laboratoire EcoLab, CNRS, UPS, INPT), Didier Galop (Gaël Le Roux (Laboratoire EcoLab, CNRS, UPS, INPT), Lluís Camarero (CEAB-CSIC), Jordi Catalán (CREAF-UAB), Jesús Miguel Santamaría (U. Navarra), David Elustondo (U. Navarra), Alberto de Diego (UPV-EHU), Ana Moreno (IPE-CSIC), Fernando Barreiro-Lostres (IPE- CSIC), Pilar Mata-Campo, (IGME), Pablo Corella (IFQSH-CSIC) Penélope González – Sampériz (IPE-CSIC), Anna Avila Castells (CREAF-UAB), Olaia Liñero , (UPV-EHU), Marisol Felip (U. Autónoma Barcelona)

RESUMEN

Los cambios en el clima durante el Holoceno (últimos 11700 años) han tenido importantes impactos en el territorio pirenaico y sus sistemas biofísicos. Particularmente significativos han sido los cambios en la disponibilidad hídrica y en la cubierta vegetal, así como en la dinámica de la criosfera y los procesos superficiales de erosión y transporte de sedimentos. A escala milenaria, el Holoceno presenta una estructura tripartita con una fase inicial con progresivo desarrollo del bosque e intensificación de los procesos superficiales de erosión y transporte hasta hace unos 8000 años, seguida de una con el máximo desarrollo del bosque en el piso montano hasta hace unos 4500 años, descenso de los procesos erosivos y menor disponibilidad hídrica y finalmente una relativamente húmeda hasta la actualidad. El impacto en el territorio de las fases más cálidas y secas durante la Anomalía Climática Medieval (900-1300 CE) y más frías y húmedas de la Pequeña Edad del Hielo (1400-1850 CE) está fuertemente modulado por la actividad antrópica. Los cambios recientes muestran las sinergias entre el Calentamiento Global y la Gran Aceleración.

Durante el Holoceno (últimos 11700 años) se han producido importantes oscilaciones climáticas que han generado cambios de diferente intensidad y duración en la distribución de la vegetación, los procesos de erosión del suelo y generación de avenidas, la dinámica de los ecosistemas de montaña, los recursos hídricos e incluso de las actividades humanas en los Pirineos (García-Ruiz et al., 2015). En esta sección resumimos los principales impactos en la hidrosfera, criosfera, biosfera y en las sociedades humanas durante este periodo, basados en el estudio de depósitos glaciales, fluviales, lacustres y de espeleotemas.

2.1 El cambio climático durante el Holoceno

Paleohidrología

El aumento de la temperatura y de la humedad a escala global al comienzo del Holoceno se reflejó en un aumento de los niveles de los lagos en las zonas más elevadas de los Pirineos y con mayor influencia atlántica. Sin embargo, en las zonas a menor altitud, más sensibles a la sequía estival, el aumento de temperaturas y el máximo de insolación estival dieron lugar a una mayor evaporación y las condiciones áridas de la fase fría del *Younger Dryas* (12900- 11700 años BP²) se prolongaron e intensificaron, retrasando el incremento de la humedad durante dos milenios más, hasta hace unos 9500 años. A escala milenaria, la evolución paleohidrológica del Holoceno en los Pirineos presenta una estructura "tripartita" (González- Sampériz *et al.*, 2017), con una fase húmeda inicial, seguida de una seca, y finalmente, una húmeda. En conjunto, el Holoceno temprano (11700-8000 años BP) constituye el periodo de mayor disponibilidad hídrica en todo el territorio pirenaico, con un descenso progresivo de la misma durante el Holoceno medio (a partir de 5500-4500 años BP), con condiciones particularmente secas en torno a 3000 – 2500 años antes del presente. Posteriormente, durante los últimos 2000 años, ha tenido lugar una cierta recuperación de los niveles de los lagos. Además de esta variabilidad a escala milenaria se han registrados también cambios hidrológicos más rápidos (a escala de siglos o menor), con aumentos en la escorrentía superficial atribuidos a eventos de precipitación intensa o alta fusión nival. En general, estos episodios se correlacionan con fases frías en el Atlántico Norte y en la Cuenca Mediterránea. Las dos últimas grandes oscilaciones climáticas (Anomalía Climática Medieval, ACM y Pequeña Edad de Hielo, PEH), registradas durante el último milenio, tuvieron una repercusión muy significativa en la hidrología de los Pirineos. La ACM (900- 1300 CE³) se caracterizó por un descenso generalizado del nivel de los lagos, con mayor evaporación y salinidad en los de zonas bajas y una gran variabilidad respecto a la intensidad de la escorrentía superficial. Por el contrario, durante la PEH (1300-1800 CE) se produjo un aumento generalizado en el nivel de los lagos, en el contexto de una fase de re- avance glacial (Morellón *et al.*, 2012). Esta sucesión de condiciones áridas y húmedas ACM-PEH durante el último milenio se ha relacionado con cambios en la Oscilación del Atlántico Norte (NAO por sus siglas en inglés), un mecanismo de variabilidad climática que provoca mayores precipitaciones de origen Atlántico en zonas septentrionales (fases de NAO+)

o meridionales de Europa (NAO-), como los Pirineos. Las reconstrucciones disponibles indican que durante la ACM predominaron condiciones de NAO+, con más precipitaciones en el Atlántico norte, mientras que durante la PEH predominaron las fases de NAO-, con mayor precipitación en los Pirineos. Si bien, debe tenerse en cuenta que el efecto local de la NAO sobre las condiciones de aridez en nuestras latitudes está sujeto a una importante variabilidad decadal (Vicente-Serrano y López-Moreno, 2008). El registro laminado del lago de Montcortés sugiere que el comienzo (1347-1400 CE) y final (1844- 1894 CE) de la PEH fueron periodos de precipitaciones más frecuentes e intensas (Corella *et al.*, 2017).

Finalmente, durante el siglo XX y en el contexto del Calentamiento Global actual, existen evidencias de un descenso en la disponibilidad hídrica en los Pirineos, con niveles más bajos en los lagos a menor altura y con una menor frecuencia de eventos de precipitación intensa. Además, el caudal de los ríos pirenaicos ha disminuido en las últimas décadas, pero en este caso además de razones climáticas, el descenso debe ser atribuido al aumento de la superficie arbolada tras el abandono rural (Beguería *et al.*, 2003; García-Ruiz *et al.*, 2016).

Erosión y procesos superficiales

El estudio de sedimentos fluviales ha permitido reconstruir periodos de mayor intensidad de inundaciones en los ríos de la península ibérica (Benito *et al.*, 2008). En las cuencas Atlánticas, las avenidas corresponden a intensas lluvias asociadas a frentes atlánticos controlados por la NAO. En las Mediterráneas, las precipitaciones extremas son inducidas por sistemas convectivos durante el otoño. El incremento de la torrencialidad registrado en lagos de altitud durante el Holoceno temprano (Basa de la Mora: Pérez-Sanz *et al.*, 2013; Marboré: Oliva-Urcía *et al.*, 2018) o en altitudes medias en periodos más recientes (Montcortés: Corella *et al.*, 2016) está asociado a una mayor disponibilidad hídrica y marcada estacionalidad. En concreto, los sedimentos laminados del lago de Montcortés proporcionan el primer registro con resolución anual de eventos de precipitación intensa (>90 mm) durante los últimos 3000 años y muestran que en las zonas con influencia Mediterránea de los Pirineos, las lluvias torrenciales han sido más frecuentes durante periodos más cálidos (ACM) que durante los fríos (PEH). La

variabilidad hidroclimática más alta se registró durante la transición entre la Anomalía Climática Medieval (ACM) y la Pequeña Edad de Hielo (PEH) (siglo XIV). Durante algunas de las fases de la PEH con inviernos más secos y fríos, el caudal de los ríos habría disminuido y las avenidas fueron menos frecuentes y más irregulares en comparación con la ACM (900–1300 CE). Las tasas de denudación⁴ durante el Holoceno han cambiado en función de la intensidad de las precipitaciones, el tipo de cubierta vegetal y usos del suelo y la disponibilidad de sedimentos. A escala regional los aportes sedimentarios fluviales hacia el mar probablemente aumentaron durante los periodos de mayor actividad fluvial en el Holoceno temprano y tardío. El delta del Ebro experimentó un notable aumento durante el periodo romano, muy probablemente debido a una mayor actividad agrícola y minera en toda la cuenca, aumentando las fuentes de sedimentos. En las cuencas ibéricas, las mayores fases de agradación fluvial⁵ corresponden a la época medieval (1000 – 1500 CE), probablemente por un mayor impacto antrópico contemporáneo al final de la ACM y el comienzo de la PEH (1300–1400 CE) (Benito *et al.*, 2008). La presencia de un nivel con restos de material carbonizado correspondiente a los siglos X-XI en el Lago de Tramacastilla (Valle del Gállego) refleja un momento de incendios generalizados provocados para ampliar el área ocupada por los pastos subalpinos aprovechados por los ganados trashumantes en verano (Montserrat, 1992). En la vertiente sur de los Pirineos, el siguiente periodo de intensa erosión ocurrió con el máximo demográfico a finales del siglo XIX y comienzos del XX, causado muy probablemente por una mayor intensidad en la explotación de los recursos en el medio rural (García-Ruiz *et al.*, 2015) y favorecido por una mayor frecuencia e intensidad de avenidas durante las fases finales de la PEH (siglo XIX).

Los cambios más recientes en la intensidad de los procesos erosivos y el transporte de sedimentos por la red fluvial, están fuertemente determinados por los cambios en el uso del suelo acontecidos en las últimas décadas (abandono rural, reforestación). La tendencia de las últimas décadas hacia un mayor déficit hídrico y menos eventos extremos no es inusual en el contexto del Holoceno tardío en el Mediterráneo Occidental. Sin embargo, las series temporales más largas sugieren que la frecuencia de las lluvias torrenciales puede aumentar en un escenario de calentamiento global (Corella *et al.*, 2016).

(2) Para las edades Before Present (BP) se considera el año 1950 como el “presente”.

(3) Las edades “Common Era” (CE) y “Before Common Era” sustituyen a la notación tradicional en arqueología de AD y BC.

(4) (5) La agradación es la acumulación de sedimentos en los ríos, arroyos o lagos. La denudación es la erosión de los suelos y sedimentos de las cuencas de recepción.

Evolución de la criosfera

Probablemente, la mayoría de los glaciares pirenaicos desaparecieron en los primeros milenios del Holoceno o quedaron restringidos a los circos más elevados (García-Ruiz *et al.*, 2014). Muchos de estos glaciares se expandieron durante el Neoglacial (hace unos 5000 años) y en varios circos se han documentado fluctuaciones posteriores como el retroceso glaciar durante la Edad del Bronce y el periodo húmedo romano y una corta expansión durante la Baja Edad Media entre los años 600 y 800 CE. Durante la PEH muchos glaciares pirenaicos avanzaron hasta alcanzar la máxima extensión de todo el Holoceno. A mediados del siglo XIX finalizó la PEH y los glaciares pirenaicos acusaron muy pronto el calentamiento posterior. Desde 1850 los glaciares han retrocedido de forma casi continuada, a pesar de que se han dado breves periodos de estabilización o incluso de cierta recuperación. La degradación de los glaciares ha sido particularmente acusada desde 1980. En siglo y medio han desaparecido muchos de ellos, otros han pasado a ser simples neveros y, finalmente, otros continúan dentro de la categoría de glaciares, pero han experimentado notables disminuciones en tamaño y espesor (Rico *et al.*, 2017). La evolución de algunos glaciares y del manto de nieve en el piso subalpino muestra que incluso en años con elevada innivación, los glaciares siguen retrocediendo (García-Ruiz *et al.*, 2015; López-Moreno *et al.*, 2016). Pequeños sectores con permafrost siguen presentes por encima de 2600 m s.n.m., donde se han identificado suelos poligonales y hasta un total de 13 glaciares rocosos están todavía en activo.

Cambios en la vegetación

El comienzo del Holoceno en las zonas de los Pirineos con mayor influencia Atlántica dio paso a un gran desarrollo del bosque en los pisos montano y subalpino. Las variaciones entre el desarrollo de coníferas y caducifolios en los primeros milenios revelan la rápida respuesta de la vegetación a las fluctuaciones climáticas. La marcada estacionalidad del clima durante este periodo y la elevada evaporación en verano provocó que en zonas de mayor influencia Mediterránea, el paisaje estépico perdurase hasta hace unos 9200 años. A partir de ese momento, un aumento de las temperaturas invernales y una mayor disponibilidad hídrica permitieron la expansión del bosque caducifolio dominado por robles y avellanos principalmente (González-Sampériz *et al.*, 2017). Durante el Holoceno Medio, hace unos 8200 - 6000 años, como respuesta a inviernos cálidos y condiciones más húmedas con una distribución de la precipitación más uniforme a lo largo del año, se desarrollaron en los Pirineos centrales y orientales un

bosque de tipo Mediterráneo, formado por *Quercus* semi-caducifolios en el piso montano y se favoreció la retirada de las coníferas y la expansión en altitud del bosque de caducifolios, el cual pudo establecerse en el piso subalpino (Leunda *et al.*, 2017). El periodo entre 6000 y 4800 años fue una fase de transición a nivel regional durante la cual la estacionalidad se acusó con una intensificación de la estación seca, particularmente notable a menor altitud. Precisamente en estas zonas, las comunidades más afectadas fueron las de caducifolios del piso alpino y subalpino donde se produjo una expansión de los pinos, enebros y sabinas. El establecimiento final de unas condiciones más áridas hace unos 4800 años causó la desaparición de importantes masas de árboles caducifolios en el piso montano y favoreció la expansión de *Quercus* semi-caducifolios (quejigos) y perennifolios (encinas) y la expansión de *Pinus* (pinos) a mayores altitudes. La vegetación se adaptó a condiciones especialmente áridas durante dos periodos: hace 2900 - 2400 años y durante la Anomalía Climática Medieval entre 900-1300 CE. En la Pequeña Edad de Hielo, y más concretamente, durante las fases más frías y húmedas, se produjeron cambios en la estructura y composición de los bosques, aunque la menor intensidad de las actividades humanas en montaña también influyó en dichos cambios. El límite superior del bosque experimentó un ligero descenso en las áreas en que se conservaba de forma natural (Camarero *et al.*, 2015).

Desde el final de la PEH, las actividades humanas y las modificaciones en los usos del suelo parecen ser el principal motor de cambio de la vegetación en los Pirineos. Sin embargo, durante las últimas décadas, el crecimiento del pino salgareño (*Pinus nigra*) por encima del límite del bosque en algunas zonas del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido (PNOMP) sugiere un ascenso altitudinal de la vegetación que puede estar relacionado, por una parte con una menor presión antrópica pero, sobre todo, con temperaturas medias más altas en altura que permiten el desarrollo de la vegetación leñosa.

Incendios

Los incendios son perturbaciones que actúan como reguladores de los ecosistemas y a su vez están modulados por la dinámica interna de los mismos. En la vertiente sur de los Pirineos, a cotas entre los 1900 y 2200 m s.n.m, se dio una mayor frecuencia e intensidad de incendios al comienzo del Holoceno (entre 10500 y 7700 años BP) debido muy probablemente a la máxima insolación estival producida durante el Holoceno temprano, que habría favorecido una mayor aridez durante el verano, aumentando las probabilidades de incendios. Además, la expansión del bosque de

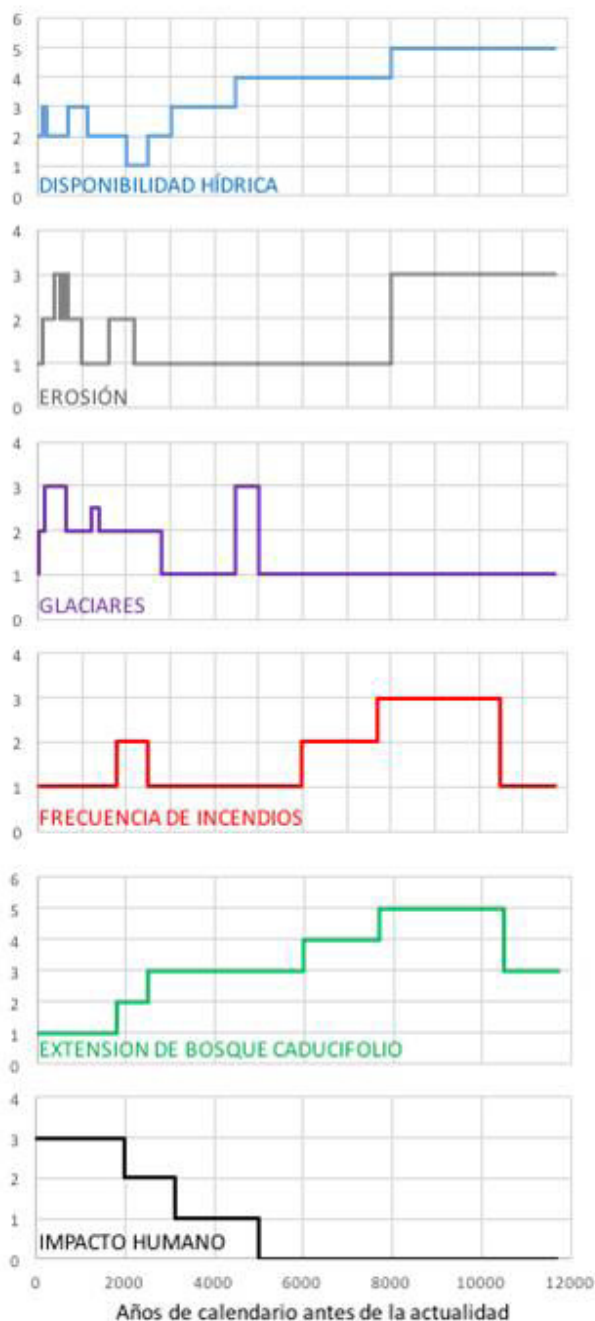


Figura 2.1.1 Resumen de los impactos en el territorio pirenaico asociados al cambio climático durante el Holoceno (últimos 11700 años). Escalas cualitativas de menor (0) a mayor. Fuente: elaboración propia

caducifolios, proporcionaría la biomasa necesaria para esta mayor frecuencia de incendios de origen natural en el *treeline* de los Pirineos centrales (Gil-Romera *et al.*, 2014). Durante el Holoceno Medio se redujo notablemente la frecuencia de incendios en la vertiente sur de los Pirineos, con una actividad del fuego moderada que podría haber estado vinculada a un manejo antrópico y a cambios en la composición del bosque. Sin embargo, en la vertiente norte la frecuencia de incendios fue mayor entre 8500 – 5500 cal yr BP, asociada a un clima más cálido y seco (Rius *et al.*, 2012). Desde el final de la Edad del Bronce y durante la Edad de Hierro y el periodo romano (esencialmente entre 2500-1800 años BP) se registró una creciente presencia humana en la montaña. Los incendios de origen humano aparecen sobre todo a partir de la Edad del Bronce, correlacionándose con cultivos nómadas, la metalurgia y el pastoreo, especialmente entre 2900 y 2650 años BP y entre 1850-1550 años BP. Desde entonces, el impacto humano sobre la vegetación y consecuentemente en la dinámica de los incendios fue sensiblemente mayor (Rius *et al.*, 2012; Gil-Romera *et al.*, 2014).

Cabe destacar que la variabilidad temporal en la actividad del fuego durante el Holoceno en la vertiente sur de los Pirineos puede estar relacionada con patrones espaciales locales de distribución del combustible y su capacidad para arder (flamabilidad) así como acciones antrópicas locales y no necesariamente regionales. A pesar de ello, sí se puede asumir que existe una diferencia altitudinal en la ocurrencia de incendios, siendo más frecuentes y antes en el tiempo en las zonas más bajas, donde el combustible y la continuidad de la cobertura vegetal no habrían sido limitantes y donde los usos humanos habrían permitido un mayor impacto.

Cambios Rápidos

Los registros paleoambientales y paleoclimáticos muestran que los ecosistemas pirenaicos y los procesos superficiales son muy sensibles a los cambios climáticos y han respondido rápidamente a las fluctuaciones del clima durante el Holoceno. Durante las fases de cambio climático rápido definidas a escala global (Mayewski *et al.*, 2004) la vegetación, la disponibilidad hídrica, la criosfera y los procesos superficiales se vieron afectados de manera rápida y su impacto en el territorio pirenaico está documentado en algunos registros como resumimos a continuación. Un evento de estas características sucedido hace 8200 años. Fue uno de los más intensos y de alcance global, provocando incluso un descenso de las temperaturas y un aumento de la aridez en latitudes intermedias como las de los Pirineos. En los Pirineos se registró cierto descenso en la proporción de caducifolios, más

sensibles que las coníferas al incremento de aridez y descenso de temperaturas, así como un claro descenso de la isoterma de 0°C, según el registro de un tipo de algas (crisofíceas) del Lago Redó (Pla y Catalán, 2011). Durante los últimos 2000 años, las rápidas transiciones en precipitaciones y temperatura durante la ACM y la PEH (Giralt *et al.*, 2017; Oliva *et al.*, 2018) se han visto reflejadas en el territorio pirenaico, demostrando la vulnerabilidad de los ecosistemas de montaña a los cambios climáticos rápidos.

Cambio Climático e Impacto Humano

Diferentes estudios muestran que durante los últimos siglos el impacto humano en la vegetación, la hidrología y la erosión en los Pirineos han sido tan intensos que no siempre es fácil separarlos de las respuestas al cambio climático. Las primeras evidencias del significativo impacto humano en el paisaje pirenaico ocurrieron durante el Neolítico, aunque algunos cambios en la vegetación pueden interpretarse como deforestación humana o repuesta a cambios climáticos (Galop *et al.*, 2013). Durante los últimos 2000 años la transformación del paisaje pirenaico ha sido intensa y continuada, y más marcada en las tierras bajas que en el piso subalpino, donde por razones evidentes la presión humana ha sido más estacional y ligada al pastoreo. Los primeros impactos claros de la actividad antrópica en altitudes bajas aparecieron hace unos 3100 años, a través de una primera fase de deforestación y la presencia de polen de cereal en España (Morellón *et al.*, 2008). Cambios en la composición de la vegetación en sitios a mayor altitud se han interpretado como respuestas a fluctuaciones climáticas o efectos de la deforestación humana (Pérez-Sanz *et al.*, 2013; Leunda *et al.*, 2017).

Desde la época medieval, son numerosas las evidencias de cambios en el paisaje debidos a deforestación y actividades humanas. Fue durante la Edad Media y coincidiendo con un periodo climático relativamente más cálido - la ACM - cuando se produjeron los grandes cambios en el paisaje de los Pirineos, con deforestación en los pisos subalpino y montano y aumento de los cultivos en las zonas bajas. Esta deforestación transformó profundamente el paisaje de la alta montaña pirenaica y, a la vez, cambió su funcionamiento hidrológico y los procesos geomorfológicos.

Durante la Pequeña Edad de Hielo disminuyó la presencia y actividades humanas en las zonas más altas debido a las condiciones frías en las cumbres pirenaicas. Sin embargo en las zonas de media montaña, el final de la PEH (mediados del siglo XIX) corresponde con el comienzo de la fase máxima ocupación humana

que se extendería hasta mediados del siglo XX. Desde entonces, el Calentamiento Global ha coincidido con el éxodo rural y el despoblamiento de la montaña.

ENCUADRE 2.1.1 LOS PIRINEOS DURANTE UN PERIODO CLIMÁTICO MÁS CÁLIDO: LA ANOMALÍA CLIMÁTICA MEDIEVAL

Durante la Baja Edad Media y coincidiendo con este periodo climático relativamente más cálido - la Anomalía Climática Medieval (ACM, 900 – 1300 CE) – se produjeron grandes cambios en el territorio de los Pirineos todavía observables en la actualidad. Una mayor presión humana en la montaña debido al aumento de la población fue paralela a una fase de temperaturas más altas y a una alta irregularidad hidrológica, caracterizada por una mayor estacionalidad y torrencialidad y una mayor presencia de fases áridas. En el piso subalpino, durante esta época se ha detectado el descenso de la superficie ocupada por los bosques de caducifolios y la mayor presencia de pinos, enebros y hierbas de carácter estépico como la ontina (*Artemisia*). En las tierras bajas, se produjo una expansión de los cultivos, especialmente cereales, olivos, viñas, castaños y nogales. Las praderas alpinas que caracterizan el paisaje actual de los Pirineos en la vertiente sur por encima de 1600 m s.n.m. experimentaron una notable expansión tras la deforestación del piso subalpino. Esta deforestación y cambios en el uso del suelo en los Pirineos, transformaron profundamente el paisaje de la alta montaña pirenaica y, a la vez, cambiaron su funcionamiento hidrológico y los procesos geomorfológicos asociados. ¿Puede servirnos la ACM como un análogo para la fase actual de Calentamiento Global? Aunque las primeras fases del calentamiento global en el siglo XX se correspondieron con un descenso de las actividades en la alta montaña debido al abandono rural, en la actualidad, el Cambio Global en los Pirineos está protagonizado por condiciones más cálidas e intensas transformaciones antrópicas. Aunque las causas de los cambios climáticos no son idénticas, ambos periodos comparten un aumento rápido de la temperatura, una mayor irregularidad hidrológica y una elevada presión antrópica.

2.2 Biodiversidad de montaña: fauna

Coordinadores: Juan Terrádez (CTP-OPCC),

Idoia Arauzo (CTP-OPCC)

Autores: Juan Terrádez (CTP-OPCC), Idoia Arauzo (CTP-OPCC)

Coautores: José Antonio Atauri (Oficina Técnica EUROPARC-España), Josep María Nebot (Universitat de Barcelona, Institut de Recerca de la Biodiversitat (IRBio) i Dpt. de Biologia Evolutiva, Ecologia i Ciències Ambientals), Bernat Claramunt (CREAF, Universitat Autònoma de Barcelona) Sofía Morcelle (SEO/BirdLife), Ricardo García-González, (IPE- CSIC), Guillem Masó Ferrerons (IPE-CSIC).

2.2.1 Cambios en la productividad y abundancia de las especies

El cambio climático puede afectar a la fisiología de muchas especies, influyendo en su productividad y en definitiva en su supervivencia a largo plazo (Parmesan *et al.*, 2006). La correlación entre variables climáticas y parámetros demográficos de las especies de alta montaña ha sido ampliamente demostrada por la comunidad científica (Provenzale, 2008; Bionda y Brambilla, 2012; Garcia *et al.*, 2014; EEA, 2016; Pacifici *et al.*, 2015; De Pous., 2016). En los ecosistemas de la región biogeográfica alpinal los impactos del cambio climático en la fisiología y productividad de algunas especies han resultado ser más evidentes que en otras regiones biogeográficas. En estos ambientes, el clima es el principal factor regulador del ecosistema y por lo tanto, las comunidades de animales y plantas se encuentran en un delicado estado de equilibrio con las variables climáticas.

Impactos observados y previstos

La reducción de la magnitud y persistencia de las nevadas registrada en las últimas décadas en los Pirineos está teniendo consecuencias en las diversas especies que habitan ambientes nivosos. Este es el caso de los grandes mamíferos de altitud como el rebeco pirenaico o sarrío (*Rupicapra pyrenaica*). Varios estudios han mostrado la correlación entre los cambios demográficos en la población pirenaica de este ungulado y los años con una cubierta de nieve inferior a un cierto umbral (Jacobson *et al.*, 2004; Willis *et al.*, 2013; Kourkgy *et al.*, 2015). En particular, se ha demostrado que los cambios fenológicos en las especies vegetales de las que se alimentan los sarríos, actúan como señal para el inicio de etapas importantes en su ciclo de vida como la reproducción, la concepción o la duración de la gestación. Análogamente, también se ha observado que algunas especies de

RESUMEN

Las condiciones climáticas juegan un rol decisivo en la composición, estructura y funcionamiento de los sistemas naturales. Los ecosistemas de alta montaña, caracterizados por una alta riqueza de especies endémicas con estrechos rangos de distribución, tamaños de poblaciones efectivos bajos, requisitos específicos de hábitat y capacidades limitadas de dispersión, son particularmente vulnerables a las variaciones de las condiciones climáticas. De hecho, en la montaña el clima es uno de los principales reguladores del funcionamiento de los ecosistemas, ya que incluso pequeñas variaciones en las temperaturas pueden incidir en la distribución y abundancia de muchas especies. Los impactos del cambio climático en la fauna de los Pirineos pueden manifestarse de diferente manera, incluyendo i. cambios generales en la fisiología de algunas especies (por ejemplo, adaptaciones fisiológicas a través de procesos microevolutivos), ii. alteraciones en la fenología de las especies (como por ejemplo variaciones en el número de eventos reproductivos, en la fecha de eclosión de los huevos o en la fecha de inicio y fin de los movimientos migratorios), iii. variaciones en la abundancia, composición y distribución geográfica de las poblaciones (que se manifiestan a través de cambios latitudinales y altitudinales del rango de distribución de las distintas especies) y que, junto con las alteraciones fenológicas, pueden desembocar en iv. alteraciones ecológicas más profundas a través de desajustes entre los ciclos biológicos de especies interconectadas entre sí (como por ejemplo los sistemas depredador-presa o planta-herbívoro), capaces de alterar el funcionamiento del conjunto del ecosistema. Además, el cambio climático podría incrementar el v. riesgo de invasión y/o expansión de algunas especies exóticas, favoreciendo su transporte y posterior asentamiento, gracias a las nuevas condiciones climáticas favorables y a la reducción de la competencia interespecífica con las especies nativas. Por otro lado, no hay que olvidar que actuando en sinergia con los impactos climáticos directos existen varios factores, en su mayoría de naturaleza antrópica, cuya magnitud los convierte en un desafío todavía mayor para la conservación de la fauna pirenaica. Entre ellos, es importante mencionar la destrucción y fragmentación del hábitat, los cambios en los usos del suelo, la sobreexplotación de los recursos hídricos, la contaminación atmosférica y de las aguas, el abandono de las actividades agropastorales y la introducción y difusión de especies exóticas. La acción combinada de los impactos antrópicos y los impactos del cambio climático, a través de las alteraciones mencionadas, pueden ocasionar la modificación de algunos procesos ecológicos clave en los ecosistemas de alta montaña, lo que podría comprometer su propia pervivencia, limitando además su capacidad para proveer bienes y servicios a la sociedad.

aves características de los ambientes de cotas altas como la perdiz nival (*Lagopus muta pyrenaica*) están viendo alterada su fisiología y abundancia a causa del cambio climático. En concreto, García-González *et al* (2016) han subrayado que el incremento de las temperaturas podría reducir la cantidad de nieve o su duración, disminuyendo la extensión de las zonas de alimentación preferidas de las perdices nivales. El menor crecimiento de la vegetación de altitud incide directamente en la disponibilidad de alimento para la perdiz nival y por lo tanto en su estado fisiológico, éxito reproductivo y capacidad de supervivencia. Según Novoa *et al* (2016) las variables que mejor explican las diferencias en el éxito reproductivo de esta especie en los Pirineos son la fecha del deshielo total y el comportamiento de las lluvias después de la eclosión de las puestas en primavera, variables que están siendo alteradas por el calentamiento global (Buisan *et al.*, 2015; Morán-Tejeda *et al.*, 2017).

Los anfibios se encuentran entre los grupos de vertebrados más vulnerables a los cambios fisiológicos inducidos por el cambio climático. Su piel permeable, ciclo de vida bifásico⁶ y huevos sin cubierta hacen que los anfibios sean extremadamente sensibles a pequeños cambios de temperatura y humedad (Carey y Alexander, 2003). Se ha demostrado que su éxito reproductivo, funciones inmunes y grado de sensibilidad a contaminantes químicos pueden verse afectados directamente por el calentamiento global (Pound *et al.*, 2006; Araujo *et al.*, 2011; Dastansara *et al.*, 2017). Uno de los efectos negativos más destacados en la fisiología de los anfibios se da principalmente a través de cambios en el período de latencia metabólica durante la temporada invernal. Un claro ejemplo es el aumento de la mortalidad y reducción de la capacidad reproductiva en algunas poblaciones de sapo común (*Bufo bufo*): los inviernos cada vez más suaves provocan el acortamiento del período de latencia metabólica invernal, causando un empeoramiento general del estado corporal de muchos individuos (Reading, 2007). Además, las temperaturas mínimas cada vez más suaves impiden que el metabolismo de estos anfibios les lleve al estado de latencia total durante el invierno, por lo que los individuos continúan consumiendo sus reservas y reduciendo como consecuencia su masa corporal. La pérdida de masa corporal incide directamente en una reducción de las probabilidades de supervivencia (Bonardi *et al.*, 2011; Caruso *et al.*, 2014). También los eventos climáticos extremos como las sequías y las olas de calor están generando efectos negativos en las

poblaciones de algunos anfibios. Se ha demostrado que la ola de calor del 2003 generó impactos negativos considerables en la supervivencia de la rana común (*Pelophylax perezi*) en Europa (Neveu, 2009). Piracés *et al* (2015) han constatado descensos poblacionales interanuales considerables en las poblaciones del tritón pirenaico (*Calotriton asper*) en nueve barrancos del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido, directamente relacionados con los años con una mayor ocurrencia de eventos climáticos extremos (principalmente avenidas y sequías).

Por último, la fisiología y el comportamiento de los invertebrados también pueden verse afectados por los cambios en las condiciones climáticas. Este es, por ejemplo, el caso de la procesionaria del pino (*Thaumetopoea pityocampa*), cuyas poblaciones en los últimos años han aumentado su éxito reproductivo y ampliado su área de distribución en algunas zonas de los Pirineos como consecuencia del aumento de las temperaturas mínimas y de la reducción de los días de lluvia (Buffo *et al.*, 2007; Rousselet *et al.*, 2010; Taïgo *et al.*, 2017).

2.2.2 Modificaciones del ciclo de vida (alteraciones fenológicas) y de las interacciones entre especies

Uno de los efectos más evidentes del cambio climático en la fauna son las alteraciones en el ciclo de vida (Knudsen *et al.*, 2011). Eventos importantes en la vida de los animales como la reproducción, la puesta, la migración y el letargo, están modificando su calendario a causa del aumento de las temperaturas. El ciclo biológico de numerosas especies está cambiando de forma significativa y el cambio climático parece ser la causa principal. Las respuestas fenológicas al cambio climático son muy diferentes entre las especies, lo que puede desembocar en la desincronización de algunas interacciones clave entre estas. Las desincronizaciones pueden acarrear alteraciones considerables en la estructura de las comunidades de alta montaña. Especialmente vulnerables a estos cambios son las especies migratorias y aquellas especies tanto terrestres como acuáticas cuya temperatura corporal depende de la temperatura ambiental (Dell *et al.*, 2005; Jiguet *et al.*, 2010; Parmesan, 2006; Dingemanse y Kalkman, 2008; Schlüter *et al.*, 2010; Tryjanowski *et al.*, 2010; Barthès *et al.*, 2014). Los cambios fenológicos, además de buenos indicadores del cambio climático, tienen una importancia ecológica crítica, ya que pueden impactar sobre la capacidad competitiva de las diferentes especies

(6) Ciclo de vida que consiste en dos fases diferentes (larva y adulto) con una metamorfosis de transición entre ambas.

y por lo tanto en la estructura de las comunidades y en definitiva en el funcionamiento del ecosistema.

Impactos observados y previstos

En el caso de las aves migratorias, la mayor variabilidad climática que ha caracterizado las últimas décadas está alterando los patrones migratorios de algunas especies residentes temporales en los Pirineos (Walther *et al.*, 2002, Rubolini *et al.*, 2007; Panuccio *et al.*, 2016). Entre los principales cambios documentados está el anticipo de la fecha de llegada al continente europeo en primavera, observado en más de 100 especies (Bradley *et al.*, 1999; Rubolini *et al.*, 2007), el retraso en la partida otoñal y en general los cambios en los patrones migratorios, particularmente intensos en las aves migrantes de corta distancia (Møller *et al.*, 2008; Saiano *et al.*, 2011; Panuccio *et al.*, 2017).

El anticipo de la fecha de llegada a Europa se ha vinculado al aumento de las temperaturas invernales en el África subsahariana, lugar de invernada de la mayoría de estas especies. Por otro lado, el retraso en la partida otoñal parece tener conexión con las altas temperaturas registradas en los lugares de llegada. En particular, Saiano *et al.* (2011) han calculado un avance promedio de la fecha de llegada de alrededor de 0,16 días al año desde 1959, con valores máximos para algunas especies de hasta 0,27 días al año.

Por otro lado, el cambio climático parece estar afectando de distinta manera a los diferentes tipos de aves migratorias en Europa. En particular, la proporción de individuos que migran largas distancias está aumentando, en detrimento del número de individuos residentes y migradores de cortas distancias (Møller *et al.*, 2011). Varios estudios proyectan una intensificación de estas alteraciones fenológicas en futuro, que podrían incluso llegar a modificar notablemente la proporción de aves migratorias de larga y corta distancia en Europa (Bloom *et al.*, 2012; Charmantier, 2014).

También los eventos climáticos extremos parecen estar relacionados con algunos cambios fenológicos en las aves. En el caso de la golondrina común (*Hirundo rustica*), especie migratoria que inverna en África y que nidifica cada año en ambos lados de la cordillera, se ha relacionado la mayor incidencia de olas de calor y sequías con una mayor variabilidad en la fecha de llegada a Europa (Saino *et al.*, 2004).

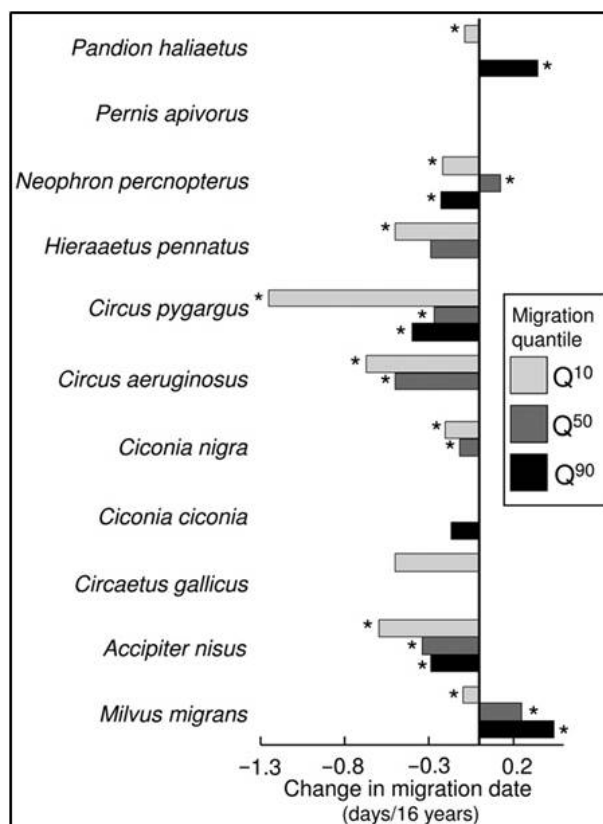


Figura 2.2.1. Estimación del adelanto de la fecha de llegada a la Península Ibérica de 11 especies de aves migratorias entre 1999 y 2011 (nº de días por 16 años). En gris claro = Q10, corresponde al 10 % de las aves contabilizadas, en gris oscuro (Q50), corresponde al 50% de las aves contabilizadas y en negro (Q90), el 90% de las aves contabilizadas. Fuente: Panuccio *et al.*, 2017

Cuando las condiciones son mejores en los lugares de invernada (pocos eventos climáticos extremos y suaves), la calidad del hábitat es mejor y la mayor disponibilidad de alimentos que ello conlleva permite a los adultos llegar antes a los lugares de cría en Europa. Como consecuencia, aumentan las oportunidades de realizar una segunda puesta con éxito (Saino *et al.*, 2004). Si en un futuro se intensificaran los eventos climáticos extremos en los lugares de invernada, el éxito reproductivo de la especie podría verse afectado, ya que podría derivar en una disminución del número de parejas capaces de realizar una segunda puesta consecutiva (Walther, 2010).

ENCUADRE 2.2.1. PROYECTO LINDUS 2: SEGUIMIENTO DE LAS AVES MIGRATORIAS, EDUCACIÓN AMBIENTAL Y ECOTURISMO EN EL TERRITORIO TRANSFRONTERIZO DE LOS PIRINEOS

Los Pirineos Occidentales constituyen un lugar privilegiado para la observación de las miles de aves que cada año utilizan la ruta migratoria occidental Europea. LINDUS-2 es un proyecto de cooperación transfronteriza en los Pirineos desarrollado entre 2010 y 2014 a través del proyecto Lindus. Su principal objetivo es la observación y registro de los pasos migratorios de aves por los puertos de montaña de esta cordillera. Como novedad, el programa científico se amplía también al estudio de murciélagos, que en gran número utilizan esta ruta migratoria e incluso hibernan en Navarra. A la labor de identificación y conteo de aves en cuatro puntos estratégicos (Lindus, Organbidexka, Portalet y Somport), Lindus-2 suma la sensibilización social que se desarrolla a través de la participación de ecovoluntarios y de otras muchas iniciativas. El proyecto busca también promover el ecoturismo ligado al avistamiento de aves en el territorio Lindus y poner en valor el patrimonio natural y cultural de la zona. Lindus-2 se desarrolla desde 2016 hasta 2018, lo que permite realizar un seguimiento de aves durante tres temporadas de migración, y permitirá obtener valiosos datos de observación para disponer de más información sobre los cambios en la fenología de las aves migratorias que anualmente cruzan los Pirineos. Además, desde el proyecto LINDUS 2 se promueven iniciativas de ciencia ciudadana como la iniciativa “cuentapájaros”, en la que se invita a los ciudadanos a participar activamente en los censos de avifauna a través de una aplicación móvil denominada “eBIRD”. El proyecto forma parte del Programa Operativo de Cooperación Territorial España-Francia- Andorra (POCTEFA 2014-2020) con una financiación del 65% procedente del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER). Es un trabajo de cooperación transfronteriza entre el Gobierno de Navarra, su empresa pública GAN-NIK (Gestión Ambiental de Navarra, S.A.), el Ayuntamiento de Burguete, SEO/BirdLife y la Ligue pour la Protection des Oiseaux (LPO-Aquitania), por lo que cubre un amplio territorio en Navarra, Aragón y Aquitania.

Los cambios fenológicos afectan también a los invertebrados. Entre los insectos, los estudios sobre los lepidópteros y principales especies de polinizadores, han revelado su especial sensibilidad a los cambios de temperatura (Herrera *et al.*, 2014). Por lo que respecta a los lepidópteros, en las últimas décadas se han registrado adelantos en la fecha de los primeros avistamientos en la mayoría de las especies estudiadas, relacionados al parecer con el aumento de las temperaturas medias (Diamond *et al.*, 2011).

Otra clara evidencia del efecto del cambio climático en la fenología de los animales se da en los anfibios. En los últimos treinta años se han registrado adelantos de entre una y tres semanas por década en la fecha de inicio de la actividad reproductiva y puesta de huevos de muchos anfibios (Scott *et al.*, 2008; Phillimore *et al.*, 2010; Green *et al.*, 2017). También los reptiles parecen haber experimentado adelantos considerables en su fenología durante los últimos 30 años. A excepción de los años más fríos, la fecha de aparición de más de 15 especies de reptiles presentes en los Pirineos se ha adelantado progresivamente cada año (Prodon *et al.*, 2017).

Es altamente probable que la tendencia actual en los cambios fenológicos de muchas especies animales se mantenga e incluso se acentúe en el futuro, a medida que aumenten las temperaturas y haya una mayor variabilidad climática a causa del calentamiento global (Vitasse *et al.*, 2018). Además de modificar los calendarios fenológicos de algunas especies, el efecto acumulado podría acabar alterando gravemente las interacciones entre las diferentes especies, con consecuencias en todos los niveles de la cadena trófica, afectando a la dinámica de muchas especies y de los ecosistemas de alta montaña (Gordo *et al.*, 2005; García *et al.*, 2014; MacCarty *et al.*, 2017).

2.2.3 Modificaciones en la distribución geográfica

Otra de las respuestas más comunes de la fauna al cambio climático consiste en el desplazamiento hacia latitudes y/o altitudes superiores en busca de áreas donde las condiciones climáticas sean todavía adecuadas, modificando así su distribución geográfica original. La mayoría de los estudios, realizados con distintos modelos y enfoques, concuerdan en prever un desplazamiento general hacia el norte de las actuales áreas de distribución, una contracción de las áreas de distribución más meridionales, y un desplazamiento hacia altitudes mayores de las especies de montaña (Parmesan *et al.*, 2006; Dirnböck *et al.*, 2011). Los efectos de estos desplazamientos podrían ser particularmente negativos en aquellas especies que se encuentran en los extremos o márgenes de su área de distribución actual, como es el caso de muchas especies de montaña. En conjunto, las variaciones en la distribución actual de las especies podrían ocasionar cambios en las actuales comunidades de montaña, que en general podrían caracterizarse por aumentos de ciertas especies generalistas, en detrimento de algunas especies más especialistas (Singer y Parmesan, 2010). Existe consenso en que la intensidad de estos desplazamientos dependerá no solo de la evolución del cambio climático y de la capacidad de respuesta de cada especie, sino también, y seguramente en mayor medida, de la

evolución de otros factores no climáticos integrados en el concepto de cambio global⁷ (Schweiger *et al.*, 2008).

Impactos observados y previstos

En términos generales, se ha estimado un desplazamiento promedio del área de distribución geográfica de las especies europeas de aproximadamente 17 km hacia latitudes mayores, y/o 11 m hacia altitudes superiores, por decenio (Chen *et al.*, 2011). Un aspecto crítico para las especies de fauna de montaña reside en que los desplazamientos ascendentes se ven a menudo limitados por otros factores derivados de la actividad humana como la fragmentación del hábitat o los cambios en el uso del suelo. Estos factores pueden alterar la conectividad entre áreas del territorio, obstaculizando las migraciones hacia altitudes superiores y por lo tanto la capacidad de las distintas especies para adaptarse a las nuevas condiciones (Dirnböck *et al.*, 2011). Además, los desplazamientos en altura, en las montañas conllevan una pérdida de hábitat, ya que el área de distribución se reduce inevitablemente a medida que se asciende. Como consecuencia, algunas especies corren el riesgo de quedar progresivamente aisladas en las pequeñas áreas de hábitat adecuado restante, con el consiguiente aumento de su vulnerabilidad e incluso riesgo de extinción, debido a la escasez de alimentos y a la cada vez menor variabilidad genética⁸ de sus poblaciones (Schneider *et al.*, 2002; Maclean y Wilson, 2011; Flousek *et al.*, 2015). Este fenómeno podría tener efectos particularmente negativos en especies y poblaciones con baja diversidad genética como por ejemplo la marmota (*Marmota marmota*). Según un reciente estudio de Bichet *et al.* (2016) las actuales poblaciones de esta especie presentan una baja variabilidad genética debido a que tras su extinción en los Pirineos hace más de 10000 años, se introdujeron de nuevo con éxito a partir de sólo dos poblaciones alpinas diferentes, que además presentaban poco intercambio genético entre ellas. El bajo número de individuos fundadores (unos 400 reintroducidos en 40 años), junto con el aislamiento geográfico y genético, son factores que podrían reducir considerablemente la capacidad de adaptación y resiliencia de la marmota frente a los efectos del cambio climático.

En la mayoría de las especies de alta montaña el límite inferior del rango de distribución está restringido por las condiciones climáticas inadecuadas, mientras que el límite superior está condicionado por la disponibilidad de un tipo particular de vegetación, especie vegetal o hábitat. Por este motivo, los cambios en el rango de distribución de las especies pirenaicas también dependerán de la capacidad de la vegetación para desplazar su área de distribución con el tiempo: si la velocidad a la que se desplazan las comunidades vegetales es menor que la velocidad a la que varían las condiciones climáticas, las nuevas áreas de distribución potencial de muchos animales podrían reducirse considerablemente respecto a las originales (Costa *et al.*, 2009; Alexander *et al.*, 2017).

En cuanto a los mamíferos, las especies endémicas de alta montaña y con baja capacidad de dispersión parecen presentar una mayor sensibilidad a los efectos del cambio climático en su distribución. Un ejemplo es el caso del desmán ibérico. Según las conclusiones de un estudio realizado por Murueta-Holme *et al.* (2010) sobre el impacto del cambio climático en este pequeño mamífero en los principales macizos del norte de la Península Ibérica, su rango de distribución podría sufrir una contracción muy importante a lo largo de este siglo. En concreto, las temperaturas medias estivales y el balance hídrico parecen ser los principales factores que determinan la presencia y distribución potencial de *G. pyrenaicus*. Se prevé que ambos factores varíen significativamente a lo largo de este siglo a causa de calentamiento global. Si las proyecciones de este modelo se confirmasen, los efectos del cambio climático, en sinergia con la pérdida de hábitat, podrían poner en riesgo la supervivencia futura de la especie. También algunas especies de aves podrían sufrir una contracción de su rango de distribución en los Pirineos. Si bien la capacidad de volar aumenta considerablemente su capacidad de dispersión, la reducción del rango de distribución de las comunidades vegetales de las que dependen muchas especies podría ser determinante en especies como la perdiz nival (*Lagopus muta pyrenaica*) (García-González *et al.*, 2016; Novoa *et al.*, 2016).

(7) Se llama cambio global al conjunto de cambios ambientales que se derivan de las actividades humanas sobre el planeta, con especial referencia a cambios en los procesos que determinan el funcionamiento del sistema Tierra (Wikipedia.org).

(8) La variabilidad genética se refiere a la variación en el material genético (genoma) de una población o especie. Para poder adaptarse a los efectos negativos del cambio climático se requiere una gran diversidad genética que permita activar mecanismos genéticos adaptativos, para contrarrestar los efectos ambientales negativos. Conforme disminuye esta variabilidad en las poblaciones de determinadas especies de animales y plantas, éstas se vuelven más vulnerables ante los cambios en las condiciones ambientales. Sin embargo, la adaptación al cambio ambiental podría hacerse también mediante lo que se conoce como "plasticidad fenotípica" (ver p.e. Kourkgy *et al.*, 2016, entre otros)

ENCUADRE 2.2.2 PROMOVER LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA GESTIÓN DE LAS ÁREAS PROTEGIDAS.

La Fundación Fernando González Bernáldez y EUROPARC-España están desarrollando el proyecto “Promover la adaptación al cambio climático en la gestión de las áreas protegidas de España”, con el apoyo de la Fundación Biodiversidad a través de la convocatoria de Ayudas para la realización de proyectos en materia de adaptación al cambio climático.

El proyecto se enmarca dentro de una de las líneas prioritarias del Plan Nacional de Adaptación de España, que pretende la incorporación de la adaptación en los diferentes sectores, en este caso la conservación de la biodiversidad. El objetivo principal del proyecto es facilitar la integración de criterios de adaptación al cambio climático en la planificación y gestión de las áreas protegidas, promoviendo el intercambio de conocimiento y de experiencias piloto entre los gestores de áreas protegidas, y desarrollando herramientas prácticas que permitan incorporar las evidencias científicas ya disponibles a la práctica de la gestión.

Para lograr estos objetivos, se ha convocado un premio de buenas prácticas de adaptación en áreas protegidas, que servirá para identificar acciones de adaptación en el conjunto del Estado y dar difusión a las mismas. Paralelamente se están incorporando de forma piloto criterios de adaptación en el proceso de elaboración del plan de gestión de tres áreas protegidas: el Paisaje Protegido de la Sierra de Santo Domingo (Zaragoza), la Zona de Especial Conservación de Urbasa y Andía (Navarra), y el Parque Nacional del Teide (Tenerife).

Los resultados de estas experiencias piloto, junto con las acciones recopiladas con motivo del premio se espera que sirvan de material de interés para el conjunto de gestores de áreas protegidas, a través de una herramienta online y de la reedición y distribución del Manual 13 “[Las áreas protegidas en el contexto del cambio global: incorporación de la adaptación al cambio climático en la planificación y gestión](#)”.

También el rango de distribución potencial de algunas especies de anfibios podría verse notablemente reducido en las próximas décadas a causa del calentamiento global. Es muy probable que debido a

los requisitos ambientales específicos de este grupo y a su alta sensibilidad fisiológica a los cambios en las variables abióticas, combinado con la creciente fragmentación de las ya estrechas franjas de hábitat adecuado, restrinjan todavía más las áreas de distribución potencial de estos vertebrados en futuro. Como consecuencia, algunas poblaciones podrían quedar cada vez más aisladas, reduciendo su resiliencia⁹ al cambio climático (Araújo *et al.*, 2006; Hickling *et al.*, 2006; Maiorano *et al.*, 2011).

En un estudio sobre el impacto del cambio climático en la distribución potencial y variación genética del tritón pirenaico *Calotriton asper*, Pou *et al.* (2015) han concluido que, incluso considerando los escenarios más optimistas, entre el 2020 y el 2080 esta especie endémica de los Pirineos podría sufrir una reducción considerable de su rango de distribución potencial, en parte causado por las mínimas posibilidades de dispersión que posee. A pesar de la gran pérdida de áreas potencialmente idóneas para este anfibio, los modelos también revelan algunas áreas que podrían permanecer relativamente estables en el tiempo, sobre todo en la zona central de su distribución actual (Figura 2.2.2).

Particularmente alarmantes son las proyecciones futuras para las poblaciones de algunos insectos como las mariposas. En general, se espera una reducción del rango de distribución del 80 % del total de las especies de mariposas en Europa, mientras que se estima que solo el 20% de las especies podría beneficiarse de los potenciales efectos positivos derivados del aumento de las temperaturas medias (Settele *et al.*, 2008). Es importante subrayar que los Pirineos concentran la mayor densidad de especies de mariposa catalogadas en los anexos de la Directiva Hábitats (Romo *et al.*, 2015). Esto se debe a que en la bioregión pirenaica confluyen los requisitos ecológicos y bioclimáticos particulares de muchas de estas especies. Teniendo en cuenta que la extensión de los rangos de distribución de estas mariposas está limitada principalmente por las condiciones climáticas (Romo *et al.*, 2015), es de vital importancia para su conservación a medio y largo plazo considerar la evolución de las condiciones climáticas en las políticas de conservación actuales y futuras.

Algunas especies de mariposa típicas de las zonas de montaña europeas han visto reducidas sus áreas de distribución potencial en los últimos decenios y está

(9) Resiliencia es el término empleado en ecología de comunidades y ecosistemas para indicar la capacidad de estos de absorber perturbaciones, sin alterar significativamente sus características de estructura y funcionalidad; pudiendo regresar a su estado original una vez que la perturbación ha terminado.

previsto que lo sigan haciendo en futuro (Willson *et al.*, 2015). Este es el caso de *Parnassius apollo*, especie que ha experimentado un fuerte ascenso de su límite altitudinal inferior de distribución en el sur de Francia y probablemente también en muchas zonas montañosas del sur de la Península Ibérica (Catalan *et al.*, 2017). Esta regresión parece estar directamente relacionada con una menor duración anual de la capa de nieve, que empeora el aislamiento térmico de los individuos inmaduros de esta mariposa incidiendo negativamente en su tasa de supervivencia.

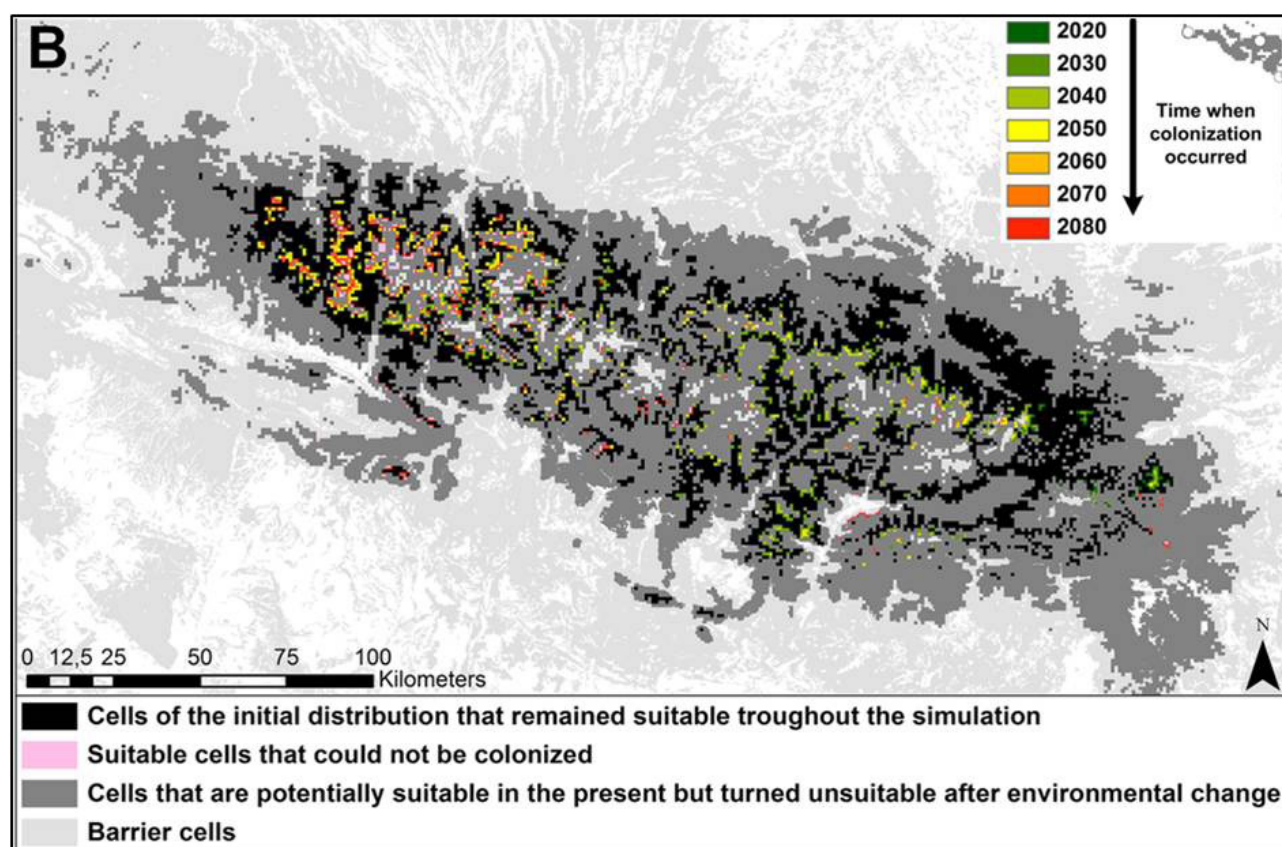


Figura 2.2.2. Evolución estimada de la distribución potencial de *Calotriton asper* en el 2080 respecto a la distribución actual, empleando la media de tres modelos de circulación global (GCM: CCCMA, HADCM3 y CSIRO) y el escenario de emisión SRES A2. Las zonas en gris corresponden a las áreas potencialmente idóneas en la actualidad para *Calotriton asper*, pero que probablemente no lo sean en futuro y las zonas en negro corresponden a las áreas del territorio pirenaico que permanecerán potencialmente idóneas a pesar de los cambios y las limitaciones de dispersión de la especie. Los distintos colores indican el momento estimado de colonización de las nuevas áreas colonizadas. Fuente: de Pou *et al.*, 2015

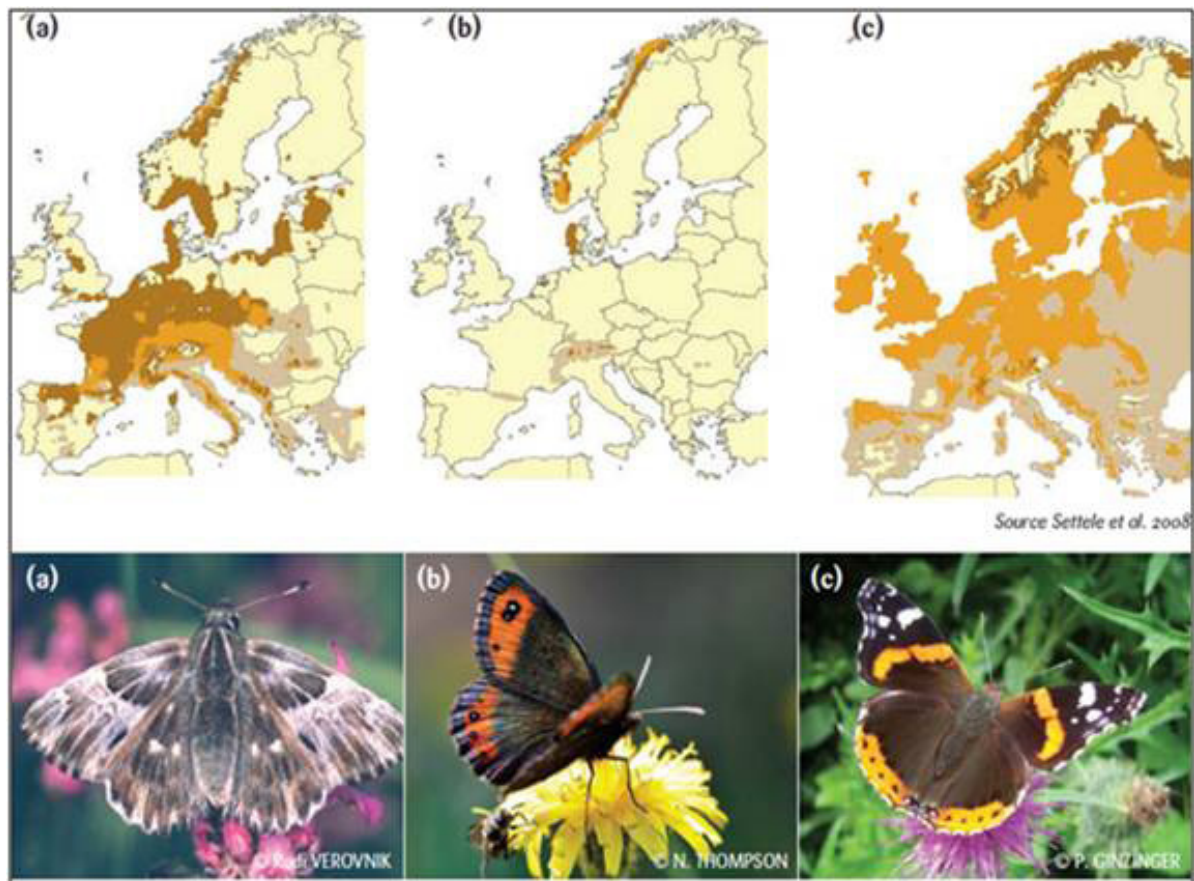


Figura 2.2.3. Cambios esperados en las áreas climáticamente idóneas (marrón claro: áreas perdidas, marrón oscuro: áreas ganadas) para tres especies de mariposas europeas (a) *Carcharodus flocciferus*; (b) *Erebia montana* y (c) *Vanessa atalanta*, en 2080, empleando el escenario emisor A2. Fuente: Settele *et al.*, 2008

Las proyecciones futuras son especialmente preocupantes para *Erebia montana*, especie para la cual todos los modelos empleados por Schmitt *et al.* (2013) predicen un alto riesgo de desaparición en los Pirineos y Massif Central a causa, al menos en buena parte, del calentamiento global.

También la distribución potencial y diversidad de algunos insectos polinizadores como los abejorros y las abejas podrían verse seriamente afectadas por el cambio climático (Lecocq *et al.*, 2013; Groom *et al.*, 2014; Miller-Struttman *et al.*, 2015). En particular, los cambios graduales en las condiciones climáticas están alterando los rangos de distribución y la fenología de estos

insectos clave (Kuhlmann *et al.*, 2012), desencadenando variaciones espaciales y/o temporales de sus nichos climáticos¹⁰ potenciales (MoolLanes *et al.*, 2013). Varios estudios han demostrado que el declive actual del abejorro en Europa puede atribuirse en parte al cambio climático y especialmente al incremento en frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos como sequías y olas de calor (Bartomeus *et al.*, 2013; Groom *et al.*, 2014). Por lo que respecta a los Pirineos, Ornos *et al.* (2017) han detectado un desplazamiento progresivo de las principales especies de abejorro hacia altitudes mayores, impulsado por la búsqueda de condiciones climático-ambientales idóneas. Al mismo tiempo, Rasmont *et al.* (2015) prevén una reducción considerable

(10) El **nicho ecológico** es un término que describe la posición relacional de una especie o población en un ecosistema. Cuando hablamos de nicho ecológico, nos referimos a la «ocupación» o a la función que desempeña cierta especie dentro de una comunidad. Por ejemplo, el nicho ecológico de las ardillas es habitar en los árboles y alimentarse de plantas y frutos secos.

de las áreas climáticamente idóneas para gran parte de las especies de abejorro presentes en la cordillera, y particularmente para *Bombus barbutellus*, *B. bohemicus*, *B. campestris*, *B. confusus*, *B. cryptarum*, *B. terrestris* y *B. cullumanus* (figura 2.2.4).

Es muy probable que en los próximos años se acentúe el proceso de declive al que se enfrentan actualmente estos polinizadores, a medida que se intensifique el calentamiento global. Si la necesidad de desplazarse en busca de condiciones adecuadas es cada vez mayor, pero las áreas climáticamente idóneas se contraen progresivamente a causa del cambio climático, la capacidad de adaptarse de estos insectos clave podría verse considerablemente reducida.

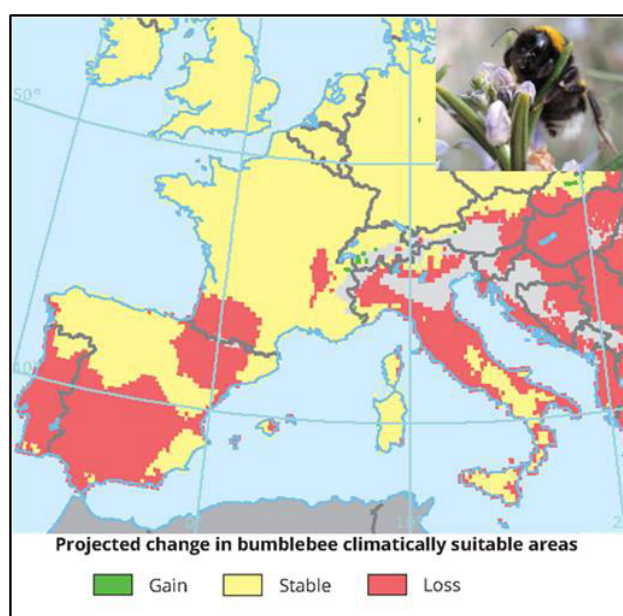


Figura 2.2.4. Cambio proyectado en el área climáticamente idónea para el abejorro *Bombus terrestris* (la especie de abejorro más grande y una de las más numerosas de Europa) considerando un escenario combinado de cambio climático y de cambios de usos del suelo según SEDG (Objetivo de Desarrollo Europeo Sostenible) y el escenario emisor SRES B1. En verde las zonas ganadas, en amarillo las zonas estables y en rojo las zonas perdidas. Fuente: EEA. 2016 de Rasmont *et al.*, 2015

2.2.4 Alteraciones de las interacciones ecológicas y del funcionamiento de los ecosistemas.

La acción combinada de los impactos del cambio climático puede provocar la desincronización entre los ciclos de vida de las poblaciones ecológicamente interconectadas, como por ejemplo las especies con relaciones presa-depredador o parásito-huésped. Si estas especies responden de manera diferente a las variaciones de las condiciones climáticas (alteraciones fenológicas diferentes), las interacciones entre ellas corren el riesgo de desincronizarse, pudiendo alterar el funcionamiento de todo el ecosistema.

Impactos observados y previstos

Las respuestas fenológicas y los cambios en la distribución de las especies tienen potenciales repercusiones negativas en las especies de niveles tróficos¹¹ superiores y en general en aquellas especies que interactúan entre sí a través de sinergias de distinta naturaleza (relaciones interespecíficas¹²). Algunos ejemplos son los casos de los sistemas herbívoro-planta, o depredador-presa, ya que los cambios en la presencia y/o abundancia que afectan a una determinada especie inciden también en las demás especies relacionadas, a través de desfases o desajustes entre los calendarios fenológicos. Estos desfases pueden alterar la capacidad de algunas especies para ejercer funciones clave en el ecosistema (Filadelfia, 2007), y como consecuencia también el funcionamiento del ecosistema.

Un ejemplo particularmente alarmante es la desincronización entre la fenología de la floración de las plantas y el ciclo de vida de las abejas (relación interespecífica planta- polinizador). Se ha demostrado que el cambio climático podría estar influyendo negativamente en la capacidad de los insectos polinizadores para polinizar las plantas (Schweiger *et al.*, 2010). Dado el importante papel que los polinizadores desempeñan en la estabilidad de los ecosistemas y en el mantenimiento de la biodiversidad tanto a escala local como global (Bascompte y Jordano, 2007), las repercusiones en el ecosistema podrían ser muy graves. Aunque todavía no ha sido ampliamente probado, es previsible que las especies de los sistemas polinizador-planta más vulnerables al calentamiento global sean las más especializadas, ya que en principio son menos flexibles en la elección de las especies con las que interactúa (Benadi *et al.*, 2014).

(11) Se denomina **nivel trófico** a cada uno de los conjuntos de especies, o de organismos, de un ecosistema que coinciden por la posición o turno que ocupan en el flujo de energía y nutrientes, es decir, a los que ocupan un lugar equivalente en la cadena alimentaria.

(12) Una **relación interespecífica** o asociación interespecífica es la interacción que tiene lugar entre dos o más especies diferentes.

Un ejemplo de alteración de la interacción entre especies a causa del calentamiento global es el caso del cuco común (*Cuculus canorus*). Este migrante de largo alcance y parásito de nido, está perdiendo la sincronía con algunos de sus principales huéspedes (Saino *et al.*, 2009; Kolářová *et al.*, 2017). Según Barret (2014) el cambio climático está alterando la asociación entre el cuco común y sus principales huéspedes habituales. Estos últimos, en su mayoría aves migratorias de corto recorrido, tienden a avanzar su llegada primaveral más que el cuco, y consecuentemente también su reproducción. Este desajuste entre migraciones y tiempos de anidación del cuco y sus hospedadores puede tener graves implicaciones en el éxito reproductivo de la especie parásita. También las mariposas parecen ser vulnerables a los problemas de desincronización entre especies. Para la mariposa *Boloria titania*, se espera que en las próximas décadas se produzca una reducción considerable del área en la que se superponen su idoneidad climática con el área climáticamente idónea para la planta que necesita para vivir (*Polygonum bistorta*). Esto podría reducir considerablemente su nicho potencial disponible en los Pirineos, aumentando como consecuencia el riesgo de extinción de esta mariposa especialista (Figura 2.2.5).

Discordancias tróficas como las de estas dos especies, constituyen una presión añadida sobre determinadas especies especialistas características de la bioregión pirenaica (Reid *et al.*, 2005; Schweiger *et al.*, 2008; Palomo, 2017), y el incrementar su riesgo de extinción futuro.

2.2.5 Mayor riesgo de invasión y/o expansión de especies exóticas

Si bien los ambientes fríos característicos de las zonas elevadas y altas latitudes se han considerado menos vulnerables a las invasiones biológicas, el calentamiento global podría incrementar el riesgo de invasiones y de establecimiento de especies exóticas también en los ambientes de alta montaña (Pauchard *et al.*, 2016). El cambio climático podría fomentar el establecimiento de nuevas especies exóticas en los Pirineos, facilitando su transporte y posterior asentamiento a través del establecimiento de condiciones climáticas favorables (Pysek *et al.*, 2013), y/o gracias a la reducción de la competencia interespecífica¹³ con las especies nativas (Hellmann *et al.*, 2008; Cubas *et al.*, 2017). Dado que las especies exóticas invasoras son en su mayoría oportunistas y generalistas, tienden a adaptarse mejor a las rápidas variaciones climáticas en comparación con la mayoría de las especies nativas (Hellmann *et al.*, 2008). Además, el aumento de las temperaturas desplaza las barreras climáticas a altitudes mayores, aumentando la probabilidad de que ocurran nuevas invasiones (especialmente de plantas) así como de que se establezcan algunas especies ya presentes (Capdevila-Argüelles *et al.*, 2011; Petitpierre *et al.*, 2016).

Impactos observados y previstos

El desplazamiento en altura del área de distribución de las especies nativas puede suponer una ventaja

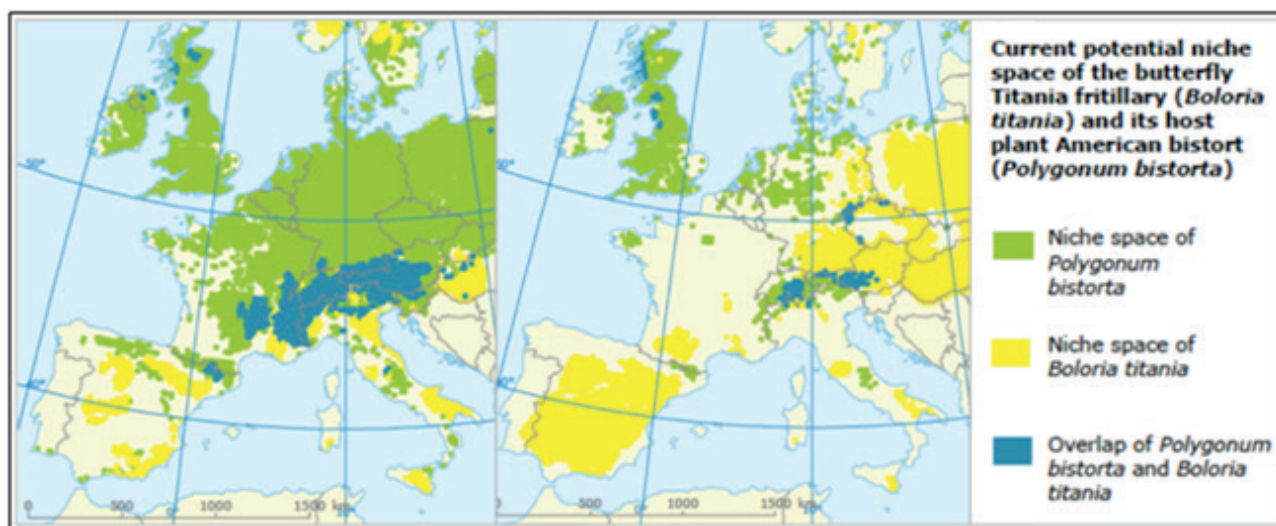


Figura 2.2.5. Nicho potencial actual de la mariposa *Boloria titania* y de la planta *Polygonum bistorta* (izquierda) y proyección de la posible reducción del área de superposición entre ambas áreas de distribución potencial para 2080 (áreas en azul), según el escenario de emisiones SRES A1B. Fuente: Schweiger *et al.*, 2008.

competitiva para la expansión y asentamiento de algunas especies exóticas, ya que estas se encuentran con nuevos nichos climáticamente idóneos y con bajos niveles de competencia por los recursos a causa del desplazamiento de las especies originales. Según el modelo empleado por Gallardo *et al* (2017), el cambio climático podría provocar un aumento de las áreas climáticamente idóneas para la expansión de algunas especies exóticas acuáticas y terrestres presentes en Europa (hasta más de un 70 % respecto al rango de distribución actual). En lo que respecta al territorio español, francés y andorrano, los resultados de este estudio prevén un mayor número de invasiones en las zonas montañosas respecto a las zonas bajas, tanto a medio como a corto plazo. Los autores también subrayan el papel clave que hasta ahora han desempeñado los espacios protegidos europeos como refugio de las especies nativas contra las invasiones biológicas, y alertan de cómo el cambio climático podría amenazar gravemente este importante rol en las próximas décadas.

Por último es importante subrayar que si bien el cambio climático podría ser un factor clave en la potencial expansión y asentamiento de especies exóticas en los Pirineos, el factor determinante sigue y seguirá siendo su introducción previa por el hombre. En este sentido, las posibles iniciativas de adaptación en este campo pasan por un aumento de la concienciación ciudadana sobre la magnitud de la problemática, así como por intensificar las actuales redes de vigilancia, control y prevención de la introducción de especies exóticas.

2.2.6 Impacto en la interconexión entre las redes de espacios protegidos

El movimiento de animales y plantas hacia áreas del territorio donde las condiciones aún sean adecuadas, podría desplazar las áreas de distribución fuera de las zonas actualmente demarcadas como protegidas, aumentando su vulnerabilidad a diferentes peligros y factores de estrés. De la misma manera, algunas áreas protegidas que hasta ahora se encontraban interconectadas a través de corredores naturales o artificiales, es probable que resulten aisladas para ciertas especies que no toleren las nuevas condiciones climáticas de los corredores. Este fenómeno podría ser especialmente notable en los espacios protegidos con presencia de especies endémicas caracterizadas por

una capacidad de dispersión reducida y un alto grado de especialización ecológica (Araujo *et al.*, 2011). La red de espacios protegidos Natura 2000 es un elemento clave en la gestión actual y futura de la biodiversidad pirenaica. Para afrontar los nuevos retos climáticos y sus consecuencias, será necesario tomar las medidas oportunas para que la capacidad de resiliencia de las especies más vulnerables, puedan superar los impactos más perniciosos del cambio climático. Para ello, es imprescindible adaptar la actual red Natura 2000 a través de iniciativas y acciones dirigidas a asegurar la interconectividad de los distintos espacios. En este sentido, la restauración de hábitats altamente vulnerables o en delicado estado de equilibrio y la protección de nuevos espacios que puedan facilitar el desplazamiento y difusión de las especies más amenazadas a medida que estas modifican su área de distribución, son algunos de los principales desafíos que las políticas de conservación deberán abordar en las zonas de montaña del territorio de la CTP. Iniciativas como la "Estrategia Europea para la Infraestructura Verde" pueden ser ejemplo inspirador, ya que propone el establecimiento de una red europea de ecosistemas saludables a través del empleo de infraestructura verde basadas en la naturaleza.

2.2.7 Conclusiones y recomendaciones

Los ecosistemas montañosos son particularmente sensibles y vulnerables al cambio climático; además con frecuencia son hábitat de una fauna muy específica o endémica. A su vez proporcionan multitud de bienes y servicios de gran valor para toda la sociedad. La comunidad científica internacional coincide en subrayar que en las próximas décadas la acción conjunta del cambio climático y la pérdida de hábitat por cambios en el uso del suelo serán las causas principales de pérdida de biodiversidad y extinción de especies en el mundo. Para comprender las respuestas de las especies pirenaicas a los efectos del cambio climático y sus distintos mecanismos de adaptación, es necesario incrementar esfuerzos para promover nuevas redes de observación de la biodiversidad de alta montaña e incentivar su dinamización, así como promover el mantenimiento a medio y largo plazo de las redes de observación ya existentes. Sólo a través de una mejora del conocimiento podrán definirse las mejores acciones de adaptación, para asegurar estrategias de conservación eficaces a largo plazo.

(13) En ecología de poblaciones, la competencia interespecífica es la interacción que se produce cuando individuos de distintas especies se disputan los mismos recursos en un ecosistema (por ejemplo el alimento o el espacio vital).

En esta sección se presentan de manera sintética y no exhaustiva los principales desafíos a los que deberán hacer frente las políticas de conservación de los Pirineos desde la perspectiva del cambio climático. También se presenta una relación de las principales recomendaciones para la adaptación, a través de su clasificación según tres tipologías de soluciones adaptativas o medida de adaptación: medidas *verdes*, *grises* y *blandas*.

Principales desafíos

- Salvaguardar las áreas pirenaicas más representativas en términos de biología de la conservación, con especial atención a los hábitats singulares, especialmente sensibles a la variabilidad climática o en un delicado estado de equilibrio con las condiciones del medio;
- Reducir las carencias de conocimiento y las incertidumbres en relación a la potencial introducción, expansión y estrategias de lucha contra plagas, vectores de enfermedades y especies exóticas invasoras;
- Incentivar la creación de nuevas redes de observación de los efectos del cambio climático en la biodiversidad, así como promover la dinamización y mantenimiento a largo plazo de las redes de observación de alta montaña ya existentes.
- Promover la integración de las consideraciones sobre la adaptación al cambio climático en los actuales planes, programas y otras herramientas de planificación y protección de la biodiversidad en los Pirineos;
- Limitar la fragmentación de los hábitats y garantizar en la medida de lo posible la conectividad ecológica progresiva de las áreas protegidas de los Pirineos;
- Impulsar estudios que combinen los factores climáticos y los riesgos antrópicos;
- Promover la colaboración e intercambio de información entre los organismos competentes en la gestión y protección de la biodiversidad en los distintos territorios, identificando e involucrando a los interlocutores de la planificación territorial,

del sector veterinario, ganadero, agrícola, forestal y organismos competentes en materia de medio ambiente y gestión de espacios protegidos;

- Identificar las áreas y especies de mayor preocupación en términos de vulnerabilidad al cambio climático y en general al cambio global, para definir áreas prioritarias para la conservación, así como oportunidades para la restauración.

Medidas soft o blandas ¹⁴

- Favorecer la creación de un catálogo de áreas pirenaicas especialmente sensibles al cambio climático para las zonas de la cordillera con ecosistemas emblemáticos y únicos, vulnerables o especialmente sensibles o que cuenten con especies amenazadas o endémicas cuya distribución y características dificultan su desplazamiento;
- Promover usos del territorio pirenaico compatibles con la conservación y con capacidad de amortiguar los efectos del cambio climático;
- Armonizar las políticas de adaptación de los demás sectores con los objetivos de protección, mejora y restauración de la biodiversidad para maximizar las sinergias positivas entre ellas (principio de desarrollo sostenible);
- Fortalecer y redirigir los actuales planes de seguimiento y control de especies pirenaicas vulnerables, planes de prevención, control y gestión de especies exóticas invasoras y plagas en consideración a los potenciales efectos inducidos por el cambio climático;
- Profundizar en el estudio del desplazamiento de los rangos de distribución de las especies causado por el cambio climático y el potencial de adaptación de las diferentes especies en riesgo.
- Actualizar las listas rojas de especies considerando su vulnerabilidad actual y potencial al cambio climático;
- Favorecer la creación de bases de datos transfronterizas, como los atlas pirenaicos de especies vegetales y animales;

(14) Las medidas Soft o medidas no estructurales para reducir o paliar los efectos negativos del cambio climático. Esta categoría de medida está típicamente representada por los estudios de investigación enfocados a cubrir lagunas de conocimiento o para enriquecer las bases de conocimiento sobre el cambio climático, sus impactos y los sectores más vulnerables. También entra en esta categoría el desarrollo de metodologías y sistemas específicos para reducir riesgos derivados del cambio climático (ej. Desarrollo de un early warning System transfronterizo para la gestión de las olas de calor en el Macizo).

- Promover la creación de mecanismos, metodologías y foros participativos para la coordinación de medidas de adaptación intersectoriales y transfronterizas destinadas a garantizar la protección de las especies y hábitats pirenaicos especialmente vulnerables al cambio climático;
- Ampliar el conocimiento y seguimiento de la estabilidad y resiliencia de los distintos ecosistemas pirenaicos y definir metodologías transfronterizas para evaluar cuantitativamente cualquier cambio en su capacidad para proporcionar servicios ecosistémicos (ej: definición de indicadores);
- Sensibilizar a la población sobre la importancia y los riesgos relacionados con el problema de las especies invasoras y sus interacciones con el cambio climático, e informar a los grupos interesados sobre las “buenas prácticas” para evitar nuevas introducciones;
- Fomentar la difusión de iniciativas de “ciencia ciudadana” en los Pirineos, concebida como iniciativas de colaboración efectiva entre ciudadanos e investigadores para enriquecer las bases de datos sobre seguimiento fenológicos de especies, observaciones de ecosistemas sensibles, recopilación de datos de muestreo y repositorios.
- Garantizar la difusión efectiva de las acciones de adaptación finalmente promovidas, su progreso y los resultados obtenidos, a todos los actores interesados y a la sociedad.

Medidas verdes ¹⁵

- Promover la identificación y posterior protección de poblaciones y subpoblaciones de especies sensibles al cambio climático, con altas tasas de intercambio genético, así como los hábitats y ecosistemas especialmente sensible o vulnerables a los efectos del cambio climático;
- Incentivar el diseño de soluciones adaptativas basadas en la naturaleza (Natural Based Solutions) para mejorar la posibilidad de migración y cambios de distribución en las áreas protegidas de los Pirineos, mediante la inclusión de corredores biológicos entre ellas (mejorar la conectividad ecológica);
- Mejorar la caracterización de los micro-ajustes climáticos de las distintas poblaciones, áreas de

IDEAS CLAVE

- Los ecosistemas montañosos son particularmente sensibles y vulnerables al cambio climático y son hábitat de una fauna muy específica o endémica.
- El cambio climático influye en la biodiversidad de las zonas montañosas a través de cambios en la fisiología y fenología de plantas y animales, cambios en la duración de la temporada de crecimiento, cambios en la distribución de las poblaciones, así como favoreciendo el riesgo de invasión, establecimiento y expansión de especies exóticas.
- Los cambios climáticos observados están alterando la distribución de algunas especies, que se ven obligadas a ascender en altura en busca de las condiciones idóneas para su desarrollo. Es altamente probable que esta situación se acentúe en el futuro a medida que se intensifique el calentamiento global.
- El ciclo de vida de muchos grupos de animales se ha adelantado en las últimas décadas, con anticipos en la fecha de puesta de algunos anfibios, aves y en la llegada de aves e insectos migratorios. Es muy probable que esta tendencia se intensifique en las próximas décadas.
- El cambio climático está afectando a la interacción entre algunas especies que dependen las unas de las otras para su supervivencia.
- Es altamente probable que la acción conjunta del cambio climático y la pérdida de hábitat por cambios en el uso del suelo sean las causas principales de pérdida de biodiversidad y extinción de especies en los Pirineos durante este siglo

refugio y gradientes climáticos variables a una escala de detalle razonable.

- Revisar y readaptar en consecuencia los límites administrativos de los espacios protegidos actuales y de los futuros, a la biología de las especies además de a los previsibles efectos del cambio climático.
- Potenciar la incorporación de gradientes altitudinales en la actual red de áreas protegidas de los Pirineos, en vistas a mejorar la protección de las poblaciones con distribuciones geográficas en proceso de desplazamiento geográfico debido al cambio climático.

(15) Las medidas verdes o basadas en los servicios ecosistémicos: esta tipología de medida incluye todas las medidas, buenas prácticas, estudios o iniciativas que tengan como principio el uso de los servicios ecosistémicos procurados por los distintos recursos naturales para paliar los efectos negativos del cambio climático (ej. prácticas silviculturales conservativas para incrementar la capacidad de los bosques del pirineo para reducir los riesgos hidrogeológicos).

2.3 Biodiversidad de montaña: flora

Coordinadores: Gérard Largier (CBNPMP)

Autores: Gérard Largier (CBNPMP)

Coautores: Gilles Corriol (CBNPMP), Jocelyne Cambecèdes (CBNPMP), Patxi Heras (Bazzania) Marta Infante Sánchez (CBNPMP), Benjamin Komac (IEA-CENMA), Daniel Gomez (IPE-CSIC), Juan Terrádez (CTP-OPCC) Estela Illa Bachs (UB).



Figure 2.3.1 : *Androsace ciliata* DC., planta endémica de los Pirineos. Photo : CBNPMP/C. Bergès

RESUMEN

Situados en un cruce de influencias climáticas muy diferentes, mediterráneas, oceánicas y montañas, y con una gran variedad de situaciones ecológicas, asociadas principalmente a la geología, el relieve, la exposición y la altitud, los Pirineos presentan una gran diversidad biológica. Su ubicación meridional, su piso alpino bastante bien desarrollado y sus altos macizos calcáreos son causa además de una gran riqueza en la flora y la vegetación, así como de una gran originalidad en comparación con las demás montañas europeas, con un elevado número de especies endémicas (cerca de 200 taxa, Villar et al., 1994). Por tanto, los Pirineos son un hot spot, un punto caliente en la biodiversidad europea. La biodiversidad de los Pirineos constituye un punto central en las estrategias de conservación de la naturaleza a escala europea, nacional y local, con una importante red de áreas protegidas. Además

del interés intrínseco de esta biodiversidad, esta riqueza original interactúa con las actividades socioeconómicas (pastoreo, gestión forestal, agricultura, turismo, actividades deportivas, etc.), algunas de las cuales desempeñan un importante papel en la organización espacial de las formaciones vegetales (pastos y bosques) y condicionan su evolución. Las zonas montañosas destacan por su sensibilidad a los cambios climáticos (Beniston et al., 1996; Theurillat y Guisan, 2001). Sin embargo, el análisis de los efectos de estos cambios climáticos y de la vulnerabilidad de los ecosistemas es relativamente complejo debido a los diferentes factores que hay en juego y, en particular, al uso humano y su evolución, al efecto de los eventos climáticos extremos, a las posibilidades de compensación entre factores y, por último, a la escasez de estudios a medio y largo plazo. Muchos estudios se apoyan en los escenarios generales de aumento de temperaturas y reducción de precipitaciones, aunque para las precipitaciones las tendencias son dudosas por el momento. Las primeras síntesis sobre la evolución del clima a escala pirenaica [proyecto OPCC1, acción clima] señalan un «incremento estadísticamente significativo de +0,2°C por década, más acentuado en primavera y verano» y «una reducción del de la precipitación anual acumulada del orden del 2,5% por década, más acentuado en la vertiente sur de los Pirineos que en la vertiente norte y difícil de distinguir a nivel estacional».

Las tendencias apuntan a un aumento de las temperaturas en los horizontes de 2030, 2050 y 2090, pero las precipitaciones invernales podrían aumentar en la vertiente norte en el horizonte de 2030 y disminuir a partir de entonces (ver capítulo 1.3 Proyecciones de cambio climático en los Pirineos), con una gran incertidumbre en cuanto a las precipitaciones. Otro factor importante a considerar es la circulación atmosférica (en concreto, el efecto foehn¹⁸, tan característico en los Pirineos), cuyos efectos a escala local sobre la distribución de la vegetación son poco conocidos. El modelo general de distribución de la vegetación en las montañas, en pisos altitudinales con variaciones según la exposición, enmascara importantes variaciones a nivel local, aún más en los Pirineos debido a la diversidad de situaciones bioclimáticas y al efecto de las compensaciones entre factores¹⁷. En definitiva, la respuesta de los organismos y sus poblaciones dependerá de su plasticidad fenotípica¹⁶ y posibilidades de evolución genética. Pueden darse adaptaciones rápidas y microevoluciones, pero a día de hoy conocemos poco acerca de estos procesos, así como sobre el modo en que un cambio climático podría actuar en combinación con el resto de aspectos del cambio global (Peñuelas et al., 2013). Determinadas especies y ecosistemas podrían estar más adaptadas de lo que se piensa a los cambios climáticos, pero aun faltan referencias sobre la materia (Martín-Vide, 2016).

2.3.1 Alteraciones fisiológicas y cambios en la productividad y abundancia de las especies

Tratándose de un meta análisis de búsqueda bibliográfica, faltan muchas evidencias científicas y mención de trabajos concretos sobre la alteración de la productividad y abundancia de la flora pirenaica. El clima es, por norma general, un factor limitante para las especies y los ecosistemas de montaña, teniendo en cuenta los factores específicos del medio montañoso (gradiente de altitud, diversidad topográfica y exposición). El cambio en los diferentes parámetros climáticos (temperatura, radiación, precipitación), junto con el aumento de la concentración de CO₂, influyen en la fotosíntesis y tiene efectos sobre el crecimiento y desarrollo de toda la vegetación, bien conocidos y documentados en las especies cultivadas y los árboles. En particular, los estudios sobre la productividad de los bosques apuntan a un desplazamiento en altitud del óptimo de crecimiento (factores limitantes: sequía, falta de presión de vapor en el aire, bajas temperaturas) (Savva. et al., 2006; Jolly et al., 2005), fenómeno que ha sido analizado en los Pirineos occidentales franceses para el haya entre 1970 y 2009 (Vitasse et al., 2010). Las presiones ambientales pueden tener efectos sobre el metabolismo de las plantas e inducir cambios en la composición química y en la concentración de nutrientes en los distintos órganos vegetales. A su vez, estos cambios pueden tener efectos sobre los suelos y sobre la apetencia de los herbívoros por las plantas en los pastos (ver capítulo 3.2), con posible incidencia sobre la cadena trófica (Rivas-Ubach et al., 2012). La adaptación de numerosas plantas de montaña a condiciones extremas (sequedad de las paredes rocosas, radiación, corta duración del periodo vegetativo, peso de la nieve) puede llevarlas a una situación crítica si estas condiciones se atenúan y llegan especies más competitivas. El CENMA ha estudiado la distribución potencial del rododendro frente al cambio climático en Andorra utilizando la acumulación potencial de nieve (la presencia de nieve en invierno y primavera es esencial para la especie). De acuerdo con los tres escenarios climáticos, el nicho ecológico de la especie podría reducirse entre 37,9-

70,1 km² respecto al área actual hacia finales de siglo, quedando limitado a hábitats de pastos pedregosos y canchales (Komac et al., 2016). Un efecto paradójico del aumento de la temperatura global en la montaña sería que las biocenosis quionófilas, asociadas a una larga innivación, estarían sometidas a temperaturas más frías debido a una menor protección del manto de nieve. En el marco del programa FLORAPYR, uno de los objetivos prefijados es justamente el seguimiento de los neveros pirenaicos para estudiar la evolución de estos medios tan particulares en función de los cambios en los parámetros climáticos (temperatura y duración de la innivación, Komac & Olicard, 2014, cf. infra).

2.3.2 Cambios del ciclo vital (cambios fenológicos)

Los trabajos sobre fenología señalan un desfase de los ciclos fenológicos, que varían según los años (adelanto del ciclo en las primaveras cálidas y retraso en las primaveras frías). Diversas fuentes reconocen el avance de las fechas de brotación y una prolongación en la duración del periodo vegetativo (Menzel *et al.*, 2006; Linderholm, 2006; Menzel & Fabian, 1999; Vitasse *et al.*, 2009). Sin embargo, los datos de seguimiento en montaña parecen ser todavía insuficientes para revelar tendencias a largo plazo y poder discernir entre los cambios debidos al calentamiento global y aquellos derivados de la variabilidad interanual de las temperaturas, de acuerdo con los datos recogidos en el ámbito del programa científico y pedagógico Phénoclim, iniciado en 2004 y basado en la observación participativa de la fenología de una decena de especies en los Alpes (CREA, <http://phenoclim.org/fr>). Los cambios fenológicos pueden tener efectos en la precocidad de la floración y fructificación, sobre el ciclo de desarrollo de los insectos (paso más rápido de un estado larvario al siguiente) con el consecuente riesgo de desincronización en la interacción entre organismos (plantas/polinizadores, plantas/herbívoros, ver punto 2.2.4). Por último, nótese que el calentamiento y la sequía tienen efectos contrarios sobre la fenología de la senescencia foliar¹⁹ de las especies de hoja caduca y, en consecuencia, «*el impacto de los cambios climáticos*

(16) El viento foehn o föhn se produce en relieves montañosos cuando una masa de aire cálido y húmedo es forzada a ascender para salvar ese obstáculo.

(17) El efecto de compensación entre factores se da en sistemas donde confluyen varios factores simultáneamente, cuyos efectos combinados pueden contrarrestar el efecto individual de cada uno de ellos.

(18) La plasticidad fenotípica se refiere a cualquier cambio en las características de un organismo en respuesta a una señal ambiental. Es decir, la propiedad de un genotipo de producir más de un fenotipo cuando el organismo se halla en diferentes condiciones ambientales.

(19) « El fotoperíodo y la temperatura son los principales factores que controlan la senescencia de las hojas en las especies caducifolias de invierno, añadiendo la influencia adicional que impone el estrés hídrico. El fotoperíodo ejerce un control estricto sobre la senescencia de las hojas en latitudes donde los inviernos son severos, y la temperatura gana importancia en la regulación a medida que los inviernos se vuelven menos severos. En promedio, la senescencia de las hojas se retrasará con el calentamiento climático y se avanzará con la sequía, con diferente intensidad dependiendo de la especie. » (Estiarte & Peñuelas, 2015)

dependerá de la importancia relativa de cada factor» en un determinado territorio (Estiarte y Pañuelas, 2015).

2.3.3. Alteraciones ecológicas y del funcionamiento de los ecosistemas

Los ecosistemas pascícolas de alta montaña han sido especialmente estudiados (Grime 1973; Callaway *et al.*, 2002; Adler *et al.*, 2011). Ha sido ampliamente reconocido que una mayor diversidad específica está relacionada con formaciones asociadas a presiones medias de pastoreo o siega y que la interacción entre las plantas, frecuentemente considerada negativa (competición), puede tener efectos positivos (facilitación) y ser un factor determinante de una elevada diversidad (Michalet *et al.*, 2006; Grime *et al.*, 2000). Los efectos de los cambios climáticos se manifestarán de forma combinada con estas presiones, como, por ejemplo, la combinación del estrés de origen climático y las perturbaciones antrópicas. En este sentido, la mayoría de los modelos coinciden en que en las próximas décadas el efecto combinado de estos factores podría alterar todavía más el funcionamiento de los ecosistemas ya perturbados, alterando su diversidad incluso hasta los límites del colapso (Grime *et al.*, 2000; Brooker, 2006).

ENCUADRE 2.3.1. PRUEBAS PILOTO PARA ESTUDIAR EL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS ESTIVAS DE LOS PIRINEOS.

Una experiencia llevada a cabo los años 2010 y 2011 en las estivas de Pierre-Saint-Martin (Pirineos Atlánticos) mediante un dispositivo que permite modular las precipitaciones, simular la siega y testar diferentes situaciones de competencia ha permitido analizar las interacciones entre, por un lado, la sequía derivada del efecto combinado de un cambio climático y las perturbaciones antropogénicas y, por otro lado, el papel moderador de las interacciones bióticas. Los resultados muestran que las interacciones entre especies son el factor preponderante sobre la diversidad. Estas interacciones pueden inhibirse a causa de niveles elevados de estrés hídrico y de perturbaciones (Le Bagousse-Pinguet *et al.* 2014). No obstante, la disminución de la precipitación en la vertiente norte no es evidente y cabe mencionar que según Le Treut (2013: 230) la mayoría de las investigaciones tratan «sólo de los efectos del aumento de la temperatura o, puntualmente, de la reducción de las precipitaciones», y esto, de momento, no se corresponde necesariamente con la tendencia observada en ciertos sectores de la cordillera.

En el caso de los bosques, cabe preguntarse sobre el posible efecto amplificador de las variaciones (y los cambios climáticos sobre las masas forestales, donde la composición específica de su estrato arbóreo y/o su diversidad genética podrían verse reducidas como consecuencia de una gestión caracterizada por el empleo de un número reducido de especies-objetivo y por ciertas decisiones silvícolas, en particular en bosques con nichos ecológicos muy diversificados. Se conocen los efectos de las intervenciones silviculturales en la diversidad genética de los árboles forestales, aunque no estén suficientemente documentados (Valadon, 2004). El proceso de adaptación, que incluye las fases de creación y de erosión de la diversidad genética, interactúa en efecto con las condiciones ambientales y el cambio climático, pero también con la gestión (Lefèvre y Collin, 2009).

2.3.4 Cambios en la composición y en las interacciones entre especies en la comunidad ecológica

La modificación de las áreas de distribución de las especies es uno de los efectos esperados del cambio climático, bien por reducción, desplazamiento o extensión de las áreas de distribución, en función de las características de las especies y del medio que ocupan. Su reducción y/o desplazamiento puede llevar a la extinción local de determinadas especies en todas las altitudes, y especialmente a través de la desaparición de nichos ecológicos en los pisos bioclimáticos más elevados (Bergamini *et al.*, 2009; Colwell *et al.*, 2008; Thomas, 2010; McCain y Colwell, 2011;), fenómenos que probablemente modelaron la composición florística actual, en respuesta a variaciones climáticas del pasado. La complejidad de los factores ecológicos en la montaña provoca que los fenómenos de compensación puedan contradecir estas previsiones (como por ejemplo, el efecto de las inversiones térmicas en los valles más encajonados). Además, los estudios sobre el impacto del cambio climático que emplean enfoques centrados en las «especies» son a menudo simplistas y reduccionistas, descuidando algunos factores clave, y no tienen en cuenta otros factores clave como las interacciones entre las distintas especies, el funcionamiento y posibles dinámicas de sus comunidades, o el papel clave que desempeña la diversidad genética (Austin, 2002, 2007). De hecho, muchos estudios alertan de posibles respuestas como por ejemplo la modificación del grado de competencia entre algunas especies, que podría permitir que algunas de ellas se mantuviesen estables a pesar del cambio climático o migrasen hacia pisos más bajos, mientras que otras lo harían hacia altitudes superiores (Lenoir *et al.*, 2010). En los macizos montañosos en los que se ha

estudiado los efectos de cambios climáticos en la flora y la vegetación, la tendencia general señala un aumento del número de especies vegetales con necesidad de calor, en detrimento del número de especies con necesidad de condiciones más frías (fenómeno llamado termofilización, Holzappel y Vinebrooke, 2005) aunque con gran variabilidad en la respuesta según macizos e incluso a nivel local en un mismo macizo (Gottfried *et al.*, 2102).

Las comunidades vegetales de los neveros, formadas por una flora muy específica como el sauce enano (*Salix herbacea* L.), son particularmente sensibles a los cambios debido a que se encuentran en lugares con condiciones edáficas particulares y microclimas altamente selectivos (Grabherr, 2003). Los neveros son sin duda el hábitat natural alpino donde las condiciones microclimáticas pueden cambiar con mayor rapidez (Grabherr, 2003; Heegaard y Vand-vik, 2004). En el caso de escenarios de calentamiento futuro, con adelantos de la fecha de deshielo, tendría como consecuencia la prolongación del período vegetativo, un aumento de la evaporación y de la actividad biológica de los suelos, así como una mayor exposición de la vegetación a temperaturas más bajas. Estos dos efectos podrían contribuir a la evolución ecológica del medio, ya que este podría ser ocupado por otras especies menos especialistas y más oportunistas (o, al contrario, más resistentes al frío). Por el contrario, el aumento de la duración media del manto de nieve o de heladas tendría como consecuencia una reducción del período vegetativo, ya bastante limitado, y la alteración de la composición o estructura de la vegetación.

La vegetación de los neveros alpinos, fundamentalmente perenne y adaptada a su ambiente, es sin embargo capaz resistir a variaciones climáticas interanuales muy importantes y de reaccionar a tendencias a largo plazo. El rendimiento reproductivo de algunas plantas podría verse incluso más afectado que su ciclo fenológico (Lluent *et al.*, 2013). A través del programa FLORAPYR se está dando continuidad al dispositivo de seguimiento de los neveros implementado en el marco del programa OPCC-1, (14 parcelas en tres países: España, Francia y Andorra, Komac y Olicard, 2014). Los resultados actuales del estudio sobre la vegetación y los informes anuales sobre la fenología y temperatura, elaborados desde diciembre de 2011, aún no permiten determinar tendencias claras. El dispositivo se consolidará con otros trabajos complementarios y, concretamente, con la implantación de unidades de simulación de calentamiento (instalación de Open Top Chamber) en 4 parcelas.

ENCUADRE 2.3.2 EL DISPOSITIVO INTERNACIONAL GLORIA DE SEGUIMIENTO DE LA FLORA ALPINA.

Hasta la fecha, existe un mayor número de estudios sobre el impacto del cambio climático sobre grupos de fauna (aves, mariposas, libélulas, insectos polinizadores) que sobre la flora y la vegetación (Le Treut, 2013) (más información en el capítulo 2.2.3). La vegetación alpina es particularmente sensible a los cambios medioambientales y generalmente reacciona rápidamente a las variaciones climáticas. El dispositivo internacional GLORIA tiene como objetivo estudiar la evolución de la flora alpina a través de un protocolo implementado sobre el conjunto de montañas alpinas del mundo. Este dispositivo cuenta con seis parcelas de seguimiento florístico en la Península Ibérica, dos de ellas en el Pirineo aragonés (Pauli *et al.*, 2004). Los primeros análisis desde el arranque del dispositivo (2001) y el primer seguimiento (2008) indican un ascenso medio de la flora alpina europea de 2,7 m durante el periodo considerado, con diferencias importantes entre las montañas bajo influencia mediterránea, que pierden especies (menos 1,4 especies de media durante el periodo considerado), y los macizos del norte de Europa, que en general ganan especies (más 3,9 de media durante el periodo considerado) (Pauli *et al.*, 2012). Estos resultados no parece contradictorio con la posibilidad de termofilización, simplemente, las montañas meridionales perderán especies debido a los efectos de la sequía estival (Moncorps, 2015). GLORIA tiene la ventaja de ser un dispositivo de seguimiento a largo plazo, lo que permitirá confirmar o desmentir tendencias a medida que las series de datos vayan cubriendo una mayor escala temporal. Sin embargo, el dispositivo no permite un análisis de la situación en cada macizo por separado, ya que los esfuerzos de muestreo son insuficientes para este propósito. En los Pirineos, está previsto el establecimiento de dos nuevas parcelas en el marco del programa FLORAPYR. Por último, el seguimiento de la temperatura en las parcelas GLORIA suministra información sobre la duración del período vegetativo en el piso alpino que será interesante comparar con los datos recogidos en los emplazamientos de seguimiento ubicados en los neveros.

Actualmente, a escala de los Pirineos, Le Treut. (2013) señala que «aparentemente, ningún análisis permite estimaciones cuantitativas del riesgo de extinción para las especies enfrentadas al cambio climático» y considera que «estas estimaciones siguen estando fuera de nuestro alcance, teniendo en cuenta la capacidad actual de modelización y la naturaleza de los datos disponibles o que se puedan recopilar». En el marco del apartado Biodiversidad del proyecto OPCC1, se hizo un primer intento de identificar especies sensibles al cambio climático en los Pirineos, elaborando una primera lista de unas 80 plantas. Esta aproximación todavía no está completamente desarrollada. La realización de la lista roja de la flora de los Pirineos en el marco del programa FLORAPYR debería incluir un criterio de sensibilidad al cambio climático (en realización en 2018/19, metodología: (UICN, 2012, criterios A3, A4 o B2 (b)), sin embargo, un criterio así es difícil de definir, teniendo en cuenta las incertidumbres sobre los escenarios climáticos.

Con frecuencia se considera que el límite superior actual de los bosques pirenaicos probablemente ascenderá como resultado del cambio climático, suponiendo una amenaza para el pastoreo a causa de la ocupación de los pastizales de verano por el bosque. Cabe mencionar que en los Pirineos los bosques alcanzaron altitudes más elevadas en el pasado. Muestra de ellos son los vestigios de explotación de bosques que se encuentran en Ariège hasta los 2200 m de altitud (Bonhote et al., 1988) en la Edad Media. El abandono pastoral es sin duda un factor preponderante en el incremento de árboles en altitud y del límite superior de los bosques (Bodin, 2010). Además, la posible evolución interna de la composición de los bosques a altitudes medias está todavía poco estudiada (por ejemplo, la recolonización del abeto en los bosques de hayas en las áreas en las que había retrocedido debido a la actividad humana pasada. Algunos trabajos centrados en los Alpes han podido demostrar que la dinámica forestal ha producido un desplazamiento aparente de especies hacia altitudes superiores debido al efecto de densificación y de maduración de los bosques de altitudes medias (Bodin et al., 2013).

A baja altitud, estudios realizados sobre el haya demuestran un ascenso en altitud de su óptimo de crecimiento (Vitasse et al., 2010), y sugieren extinciones locales en el futuro a baja altitud en el piedemonte de los Pirineos noroccidentales, como ya se ha constatado

en Cataluña (Grime, 1973; Jump et al., 2006). Sin embargo, el ascenso del óptimo de crecimiento no implica necesariamente la extinción de poblaciones. Es conocido el caso de hayas que no llegan a alcanzar el estrato dominante en los bosques mixtos en situaciones de estrés edafoclimático²⁰, sin que por ello se extingan cuando la silvicultura es lo suficientemente extensiva. En el piedemonte del Pirineo central francés los estudios paleoecológicos e históricos testimonian una presencia abundante de abetos en Volvestre durante el neolítico y su regresión posterior a causa de los usos del suelo (tala de bosques, presión agropastoral, explotación intensiva), a pesar de que es una especie con una gran capacidad de colonización (Gonin et al., 2014).

El desarrollo de plantas exóticas invasoras en la montaña lleva produciéndose desde hace varias décadas, debido tanto a actividades de construcción, reforestaciones y desplazamientos (de personas y de maquinaria de construcción), como al abandono de plantaciones (como en el caso de la picea común [abeto rojo]). A menudo la introducciones conllevan serias implicaciones para el paisaje, el funcionamiento de los ecosistemas, y en definitiva en la capacidad de los sistemas de montaña para brindar determinados bienes y servicios ecosistémicos (por ejemplo pastoreo y áreas de esquí donde una especie como la picea común cierra el paisaje del Pirineo Central francés). Se ha demostrado que los ambientes fríos experimentan menos invasiones biológicas que los ambientes cálidos, por lo tanto, los cambios climáticos podrían amplificar estos fenómenos de acuerdo con los parámetros en cuestión (Pauchard et al., 2016; Gallien et al., 2016). El CENMA ha estudiado la evolución de los nichos ecológicos potenciales de *Buddleja davidii* y *Senecio inaequidens* en Andorra considerando el cambio climático durante el último siglo. Los resultados muestran que según los escenarios, entre el 10 y 70% del territorio podría ser climáticamente viable para ambas especies (entre el 10-40% para *Buddleja* y 30-70% para *Senecio*, según los resultados del estudio).

(20) Estrés fisiológico relacionado con las condiciones del suelo y del clima, atenuado por la cobertura de otras especies.

2.3.5 Vulnerabilidades y servicios ecosistémicos

Los ecosistemas tienen funciones ecológicas de soporte, regulación, provisión y servicios culturales. A continuación detallamos los servicios aportados por la flora y la vegetación que podrían verse afectados por los cambios climáticos (Moncorps, 2014), subrayando algunos elementos de vulnerabilidad (Moncorps, 2015). El papel que juega la vegetación en los servicios de soporte se materializa en el ciclo del agua, la producción de biomasa y el ciclo de los elementos nutritivos, la formación y el mantenimiento de los suelos, y la creación de un hábitat para la biodiversidad. Los servicios de regulación incluyen: la regulación del ciclo del agua, la erosión y los riesgos naturales, así como el mantenimiento del manto de nieve mediante una cubierta vegetal continua y adaptada al contexto bioclimático. Las presiones del uso relacionadas con el cambio de los usos del suelo, las presiones climáticas o incluso la elección de determinadas especies en la restauración del medio pueden afectar considerablemente a la capacidad de los ecosistemas de montaña de proveer estos servicios.

- La regulación de la calidad del agua.
- La regulación de la calidad del aire.
- La regulación del clima y del almacenamiento de carbono: aparte de la función clásica que se le reconoce a los bosques (con una capacidad de almacenamiento tres veces más importante en los bosques de montaña que en los de llanura), las praderas de la montaña media y las turberas constituyen también sumideros de carbono.
- La polinización, ya que los insectos polinizadores se ven favorecidos por la diversidad paisajística (mosaico de medios²¹).

Los servicios de provisión corresponden a los bienes comercializados, fuentes de ingresos y de empleo: la producción de madera (que se debe relativizar en los Pirineos teniendo en cuenta las dificultades de explotación relacionadas con las limitaciones naturales), la valorización del pastoreo en medios herbáceos, la valorización de los espacios para ciertas actividades de ocio (áreas de esquí), la valorización de la recolección de plantas silvestres (farmacología, cosmética, herboristería, licorería, etc.).

(21) El mosaico de medios o paisajístico se refiere a la mezcla de retazos naturales y manejados por el hombre que varían en tamaño, forma y ordenación espacial

ENCUADRE 2.3.2 EL PROGRAMA ECOVARS Y LA RESTAURACIÓN DE PRADERAS DE ALTA MONTAÑA

En los Pirineos franceses, el programa Ecovars de restauración ecológica en medios herbáceos de altitud (Malaval, 2015) (áreas de esquí y borde de carreteras) prevé mantener o restaurar estos servicios gracias a una mejora de las técnicas de intervención y a la elección de material vegetal de origen local respaldado por una marca registrada (Pyrégraine de néou). Se están desarrollando experiencias similares en Andorra y Aragón.



Producción en campo de *Achillea millefolium* L., de origen pirenaico para su uso en restauración ecológica en los Pirineos. Photo CBNPMP/Gérard Largier

Los servicios culturales incluyen:

- El ocio y el turismo: la identidad y el atractivo turístico de los Pirineos se basa en los paisajes y su aspecto salvaje, en los que la vegetación es un elemento importante (algo paradójico cuando se sabe cómo los han modelado las actividades humanas), así como las especies emblemáticas (flora endémica en particular); más allá del público en general, los Pirineos y su biodiversidad han atraído desde hace tiempo un turismo científico.
- Los valores educativos y el conocimiento científico; esto implica en particular las características y especificidades florísticas del macizo.
- La dimensión identitaria, patrimonial y artística (estética), en la que los elementos florísticos juegan también un importante papel.

Con respecto a la oferta de hábitat para la biodiversidad, una cuestión que se repite con regularidad es «¿en qué y cómo los espacios protegidos pueden ayudar a conservar la biodiversidad y los espacios de montaña» (Le Treut, 2013) en un contexto de cambio climático? Se trata de saber si las especies y ecosistemas sensibles podrán mantenerse en zonas que suelen considerarse refugios climáticos, aún cuando no estén especialmente definidas sobre la base de dicho criterio y que serán igualmente sometidos a cambios si estos tuvieran lugar. Una cuestión es la de la continuidad e interconectividad ecológica entre estas áreas y permita de mantener flujos genéticos y vías de migración. También en relación a este aspecto, los trabajos suelen estar basados en modelos de especies animales, y los expertos no están necesariamente de acuerdo con su buena representatividad para los territorios en consideración (faltan estudios de referencia para las montañas). Algunos gestores de espacios protegidos han puesto en marcha programas sobre la continuidad ecológica en el marco de los «planes climáticos» (por ejemplo en Francia, Parc National des Pyrénées, Parc naturel régional des Pyrénées ariégeois, Réserve naturelle régionale du massif de Pibeste-Aoulhet).

2.3.6 Conclusiones y recomendaciones

Le Treut. (2013) en el capítulo «Montaña» del informe «Los impactos del cambio climático en Aquitania - un estado científico de la cuestión» propone «*algunas pistas generales posibles, que hay que ajustar en los diferentes niveles de operatividad y realismo ético, de adaptación o mitigación adaptadas a los ecosistemas y especies de montaña frente al cambio climático*» que pueden aplicarse al conjunto de los Pirineos y que nosotros completamos en ciertos aspectos:

« - Reevaluar los objetivos de gestión a la luz del desafío del cambio climático y reducir en la medida de lo posible el estrés antrópico local que representan factores que pueden alterar la capacidad de resistencia de la biodiversidad a adaptarse a los cambios globales (fragmentación, contaminación...). Utilizar la diversidad de los recursos genéticos forestales locales para reforzar la capacidad de adaptación de los bosques al cambio climático. ». Se subraya sin embargo que la reevaluación de los objetivos de gestión es compleja teniendo en cuenta las incertidumbres relativas a los escenarios climáticos, en particular respecto a la evolución de las precipitaciones y la innivación. Respecto a la cuestión

de los recursos genéticos, también relacionada con los medios abiertos no forestales, recomendamos un enfoque a escala local.

« - Mantener los usos tradicionales del suelo allí donde hayan sido la forma principal de gestión, garantizando las misiones originales acordes con el mantenimiento de las culturas y las tradiciones locales históricas. Proteger las tradiciones y la herencia cultural asociadas a los territorios, que son los mejores también para garantizar el mantenimiento de la diversidad específica local y los ecosistemas sensibles (pastoreo...). »

« - Promover las iniciativas originales que aúnen una «baja presión en términos de gestión» y una «creación de heterogeneidad espacial». Por ejemplo, como en los países del norte de Europa, parece crucial seguir segando o pastando los pastos mesófilos con el fin de evitar la invasión de especies competidoras que amenazan gravemente la diversidad de las comunidades y los paisajes. ». Sin embargo, «baja presión» y «creación de heterogeneidad espacial» son opuestas y, además, la creación de heterogeneidad no es un fin en sí mismo si pensamos en la inmensidad y el alto grado de homogeneidad del sistema constituido por el bosque boreal.

« - Mantener como prioridad las características ecosistémicas esenciales (aquéllas que determinan la estructura y el funcionamiento intrínsecos) y proteger las especies (concretamente las especies clave) que sean al mismotiempo capaces de adaptarse y de ser fuente de una eventual recuperación²². Preservar las especies identificadas como redundantes («duplicaciones»), de tal forma que en caso de perturbación local subsista al menos una de ellas. Proteger las variables (recursos, especies) que puedan actuar como tampón, con un ritmo de persistencia adaptado al cambio climático (Baron et al., 2009) [».

« - Reconocer y mejorar las funciones de los espacios protegidos. Preservar las zonas identificadas como «refugios», por ejemplo, las localidades donde se desarrollan poblaciones de especies raras o amenazadas o las localidades menos susceptibles de verse afectadas por el cambio climático. Estas zonas podrían utilizarse como fuentes para la repoblación o como zonas-objetivo para establecer poblaciones trasplantadas». Estas deberían ser objeto de un estudio del estado de la cuestión previo de las introducciones

(22) resiliencia

(23) o en banco de germoplasma

de material vegetal (en particular forestal) realizadas en el pasado, con el fin de identificar los sectores exentos de fuentes genéticas alóctonas donde la diversidad genética y su evolución no se ven afectadas por contribuciones exógenas. La preservación de estas zonas refugio debe comprender medidas de cara a las especies exóticas invasoras.

« - En los casos más extremos, para las especies mayormente afectadas, se recomiendan ciertas estrategias de mitigación 1) el mantenimiento y la reproducción en cautividad²³ de especies en alto riesgo de extinción y/o 2) la translocación (migración asistida) de poblaciones, el desplazamiento de organismos de una zona a otra, separada por una barrera (zona urbana, acondicionada...). »

« - A pesar de los efectos positivos que se esperan sobre la biodiversidad en términos de mitigación del cambio climático derivados directamente de la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), ciertos autores (Araújo et al., 2011)[apelan a un cambio de paradigma en las actuales políticas de conservación y al despliegue de aproximaciones más eficaces que los que se aplican actualmente: recalificación de áreas de conservación existentes, creación de nuevas áreas y desarrollo de mecanismos de gestión integrada más operativos que faciliten la conectividad entre áreas de conservación en su dimensión vertical (altitudinal) pero también horizontal. » Esto supone una reflexión y una organización a escala panpirenaica.

Las conclusiones del capítulo «Montaña» del informe Le Treut (2013) convergen con las del «3.^{er} informe sobre el cambio climático en Cataluña» (Martín-Vide, 2016). Recogiendo resultados de trabajos científicos que identifican impactos atribuidos a los cambios climáticos, coinciden en la misma tipología de reservas (falta de escenarios fiables o incertidumbres sobre los impactos relacionados con la imprecisión de los escenarios, investigaciones a menudo preliminares, variabilidad local elevada) y subrayan la necesidad de realizar más estudios y seguimientos sobre la temática. Subrayando también el interés de los modelos, Le Treut (2013) recomienda sobre todo «evitar generalizar con demasiada rapidez observaciones o experimentaciones realizadas en contextos específicos» y «ponderar los trabajos que se basan realmente en medidas y trabajos de campo y aquellos (a menudo más numerosos, y a escalas mayores) que se basan únicamente en modelos.».

Recordemos el ejemplo clásico de la ascensión de especies forestales que se atribuye a causa climática, cuando en realidad existen otros factores de naturaleza climática que ejercen una mayor influencia en el fenómeno. En materia de estudios y seguimientos de la biodiversidad y de la flora, los trabajos de la OPCC en general y aquéllos del programa FLORAPYR en particular, deben abordarse a largo plazo, más allá de la duración de proyectos específicos: dispositivos como el seguimiento de neveros, GLORIA o el programa de ciencia ciudadana Phénoclim necesitan una duración larga para producir series de datos analizables en relación con los datos climáticos observados. La consolidación y la puesta al día continua del Atlas de la Flora de los Pirineos, creado igualmente en el marco de la OPCC, permitirá disponer de un estado de la cuestión actualizado y disponible para realizar análisis cruzados. Por otro lado sería interesante potenciar la creación de otros dispositivos dirigidos al seguimiento de la evolución genética de las poblaciones vegetales en los sectores preservados de aportes exógenos o, *al contrario*, en sectores donde el material vegetal autóctono lleva tiempo introducido y se desarrolla en interacción con la flora local (como es el caso de la introducción de otras especies de abetos mediterráneos [complejo de especies] en el valle de Bagnères-de-Luchon, en los abetales pirenaicos [introgresión con *Abies alba*])). Tales dispositivos serían útiles para cuestionar ciertas decisiones que a menudo conducen a la introducción de especies alóctonas, sin tener en cuenta que la flora local y los ecosistemas naturales por sí mismos pueden ofrecer soluciones en un contexto de evolución.

2.4 Bosques

Coordinadores: Sébastien Chauvin (FORESPIR),

Julia Gladiné Martín (FORESPIR)

Autores: Sébastien Chauvin (FORESPIR), Julia Gladiné Martín (FORESPIR), Emmanuel Rouyer (CRPF Occitanie), Jean-Baptiste Daubrée (DSF), Christophe Drénou (CNPf-IDF), José Ramón González-Olabarria (CTFC), Pere Casals Tortras (CTFC), Raphaël Delpi (FORESPIR).

Coautores: Alejandro Cantero (Fundación HAZI Fundazioa), Jesus Julio Camarero (IPE), Lluís Coll (CTFC), Thomas Villiers (ONF).

2.4.1 Los impactos potenciales del cambio climático en la diversidad de comunidades vegetales y sobre la distribución de las especies forestales

Los recientes cambios socio-económicos de las zonas rurales, desencadenantes de un cambio de uso de suelo sin precedentes en la historia en cuanto a su rapidez, así como el ya constatado cambio climático, constituyen los principales motores de cambio global, en los Pirineos (*García et al., 2016*). Por todo ello, es ampliamente reconocida la creciente incertidumbre alrededor del ambiente climático, biológico y social en el que se desarrollarán los bosques del futuro y concretamente en el territorio del macizo pirenaico.

Cambios en la diversidad de comunidades vegetales

La transición de pastos abandonados a comunidades leñosas ha afectado a la mayoría de las montañas europeas y sin embargo todavía no se conoce bien la interacción entre el proceso de abandono de tierras agrícolas y pastorales, su transformación en paisajes forestales o "leñosos" (matorrales) y el cambio climático (*Ameztegui et al., 2016*) o servicios ecosistémicos, como la biodiversidad o el secuestro de CO₂ (*Montané et al., 2007; García-Pausas et al., 2017*).

En un estudio reciente sobre los cambios en la cubierta vegetal en el Pirineo aragonés entre 1957 y 2007 se ha observado un importante proceso de revegetación, con avance de los matorrales de sucesión y del bosque (*Lasanta y Vicente-Serrano, 2007*). Estos autores concluyen que los cambios de vegetación ocurridos en los últimos veinte años contribuyeron en unos casos a homogeneizar la cubierta vegetal y, en otros, a su heterogeneización. La homogeneización tiene lugar principalmente en bosques que se densifican por la ausencia de explotación forestal, mientras que los

RESUMEN

El bosque cubre el 59% de la superficie de los Pirineos y representa al mismo tiempo un recurso natural, un ecosistema rico en biodiversidad, un espacio turístico y de uso público que es especialmente apreciado, un elemento de protección contra los fenómenos naturales (avalanchas, desprendimientos de piedras, crecidas...) y un importante reservorio de CO₂. El relieve, las exposiciones diversas, las influencias climáticas atlánticas y mediterráneas y la diversidad de sustratos geológicos, se traducen en condiciones de fertilidad muy variadas (FORESPIR, 2007). En las últimas décadas los bosques de montaña han experimentado un proceso de cambio importante resultado de un entramado de factores socioeconómicos y ambientales (*Ameztegui et al., 2010*), pero los factores climáticos, biológicos y sociales en los que los bosques tendrán que desarrollarse son inciertos todavía. Los modelos climáticos a escala local prevén un aumento de las temperaturas y poca evolución de las precipitaciones medias acumuladas anuales. Sin embargo, los principales modelos prevén un aumento importante de la variabilidad estacional de la precipitación con, de manera general, un proceso cada vez más acentuado de aridez especialmente marcado en invierno y verano. Fuera de toda intervención humana esta evolución climática puede generar un impacto en los bosques de los Pirineos, asociado al aumento de la sequía edáfica estival (*Aussenac y Guehl, 2000; Breda et al., 2006*) así como la alteración del régimen de ciertas perturbaciones (plagas, incendios, vendavales). Al mismo tiempo, el nuevo contexto climático en sí mismo, podría provocar un aumento en la tasa de crecimiento de los árboles, en respuesta a la extensión de la estación de vegetación y de acentuación de la actividad fotosintética. Más allá de los potenciales impactos de las modificaciones climáticas sobre los árboles y los bosques en sí mismos, es importante tener en cuenta las consecuencias previsibles sobre las numerosas funciones y servicios ecosistémicos de los bosques de montaña. El cambio climático puede dificultar de manera importante la multifuncionalidad de los bosques pirenaicos, motivado por un mayor decaimiento de la masa forestal en bosques de producción o protección, la destrucción de especies o hábitats remarcables y deterioro del paisaje forestal, entre otros procesos, así como sobre el modo en que el cambio climático podría actuar en combinación con el resto de aspectos del cambio global (*Peñuelas et al., 2013*). Determinadas especies y ecosistemas podrían estar más adaptadas de lo que se piensa a los cambios climáticos, pero aun faltan referencias sobre la materia (*Martín-Vide, 2016*).

procesos de heterogeneización ocurren sobre todo en campos y pastos abandonados, que presentan cubiertas muy variadas en función de la edad de abandono, la gestión y sus condiciones naturales. Sin embargo, los cambios en los hábitats naturales y la biodiversidad dependen de las dinámicas poblacionales de las especies que lo forman (García *et al.*, 2016). Un estudio comparativo de la comunidad del ecotono entre pastos alpinos y límite superior del bosque entre 1998 y 2009, reveló que un aumento significativo de la cobertura arbórea del 20% al 35% no era suficiente para desencadenar un cambio significativo en la riqueza y composición de las especies de plantas alpinas y subalpinas a medio plazo (Pardo *et al.*, 2013 en García *et al.*, 2016). Tampoco los pastos supra forestales parecen estar sufriendo, de momento, fuertes transformaciones de biodiversidad, a diferencia de los cambios

registrados en algunos pastos de laderas con fuerte pendientes y orientadas al sur cuya dinámica es más rápida. Sin embargo, otros estudios, como el realizado en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido por Pauli *et al.* (2012), ofrece una visión preocupante de los cambios en la biodiversidad de las comunidades alpinas. Según los resultados de este estudio, los pastos presentan un grado alto de naturalidad y flora diversa, pero al estar condicionados por las bajas temperaturas se muestran especialmente influidos por el calentamiento climático y las especies adaptadas al frío van siendo sustituidas por otras más termófilas (Gottfried *et al.*, 2012).

En concreto, se ha estimado un ascenso medio en su distribución de 2.7 m en las cimas europeas (Pauli *et al.*, 2016).

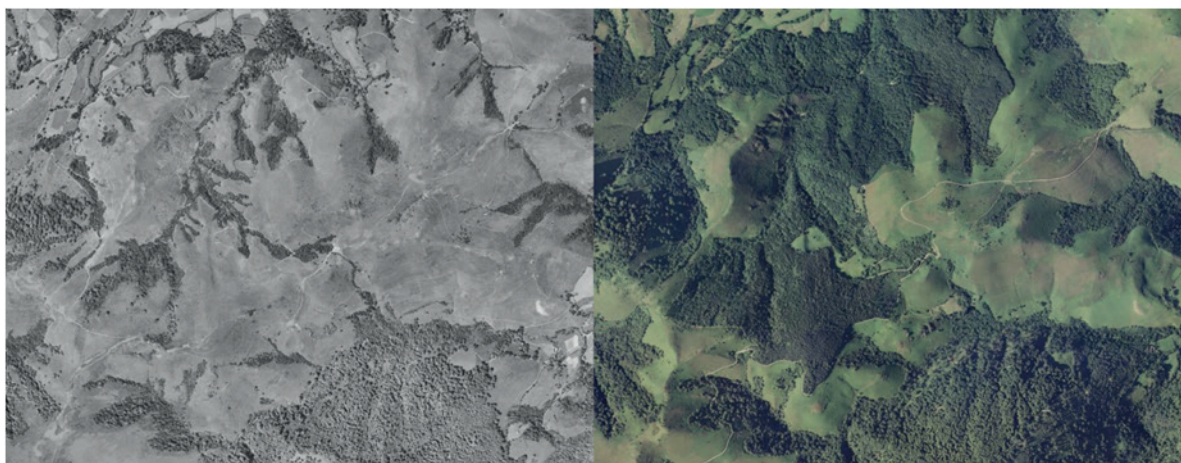


Figura 2.4.1. Ejemplo del avance del bosque en tierras agrícolas y pastorales entre 1959 y 2016 en los Pirineos Atlánticos franceses (cantón de Montagne Basque). Fuente: IGN



Figura 2.4.2. Ejemplo del avance del bosque en tierras agrícolas y pastorales entre 1945 y 2017 en el valle de Belagua (Navarra). Fuente: Sistema de Información Territorial de Navarra.

Cambios en la distribución altitudinal e las especies forestales

Las especies vegetales no muestran una distribución global, sino que restringen su distribución a determinados rangos geográficos donde los factores históricos les permitieron formarse o colonizar, y donde las condiciones bióticas y abióticas son aptas para su crecimiento y reproducción (Matias, 2012). Sin embargo, los importantes cambios de uso del suelo y del clima que se están registrando a escala global (IPCC, 2007) están alterando estas condiciones, induciendo cambios en la fenología, crecimiento y dinámica poblacional de varias especies (Matias, 2012). En Europa, el límite superior arbóreo y el piso alpino se están moviendo hacia altitudes más elevadas. En el caso de los árboles los desplazamientos hacia cotas superiores han de analizarse cuidadosamente, ya que está fuertemente relacionado con los procesos de abandono de los pastos de alta montaña: la ausencia de pastoreo permite la recolonización de espacios donde la vegetación forestal se ha desarrollado libremente, restaurando lo que era el límite superior natural arbóreo antes de la intervención humana. En un reciente estudio conducido en la vertiente sur del Pirineo ya se ha observado un desplazamiento medio del límite del bosque de 35 m en los últimos 50 años (Ameztegui *et al.*, 2016). También se ha demostrado un desplazamiento latitudinal en la mayoría de las especies vegetales de los medios forestales de los Alpes franceses (Lenoir *et al.*, 2008) el haya en España (Penuelas y Boada, 2003), y para siete especies de árboles en Escandinavia (Kullman, 2002). Otros estudios han estimado que el desplazamiento en altura de algunos pisos de vegetación podría alcanzar los 700 m bajo escenarios futuros de aumento de 4°C la temperatura media (Courbaud *et al.*, 2010). Sin embargo, pocos estudios han abordado las respuestas al cambio climático en el ámbito de las comunidades biológicas a lo largo del gradiente altitudinal de las cadenas montañosas donde se espera que la diversidad ecológica disminuya (Regato, 2008). A partir de inventarios florísticos y su comparación con inventarios históricos en distintas macizos europeos, se ha constatado que esta migración en altitud del límite del bosque ha afectado sobre todos a las comunidades de los prados alpinos, y sobre todo a especies raras o especialistas (Rixen y Wipf, 2017). Cabe decir que los estudios realizados en Francia (Badeau *et al.*, 2005; Piedallu *et al.*, 2009; Cheaib *et al.*, 2012,) y en España sobre el posible efecto del cambio climático en la distribución potencial futura de las especies forestales o de su vulnerabilidad, se han desarrollado en general a escala nacional o regional, manteniéndose los Pirineos

en una situación marginal en la cual la validez de los modelos es probablemente de menor calidad que en otras áreas, y los resultados, menos pertinentes y difícilmente explotables.

La modelización sobre la distribución potencial en el Pirineo catalán y andorrano para cuatro bosques de pino negro (*Pinus uncinata*) para los años 2020, 2050 y 2080 bajo dos escenarios diferentes de cambio climático (A2 y B2) sugiere que estas formaciones forestales tendrán, para el año 2080, áreas bioclimáticas idóneas a altitudes superiores a las actuales, alcanzando los 2.472 m de altitud media bajo el escenario A2 (escenario con una evolución probable de las temperaturas mundiales de +3,4°C para 2090–2099 respecto a 1980–1999) y los 2.340 m bajo el escenario B2 (escenario con una evolución probable de las temperaturas mundiales de +2,4°C para 2090–2099 respecto a 1980–1999), desplazando también, al menos en parte, a los matorrales y pastos alpinos montaña arriba (Pérez *et al.*, 2011; Martínez *et al.*, 2012). Sin embargo, estos bosques subalpinos podrían sufrir, en general, una reducción menos drástica del área de ocupación que los pastos de alta montaña o los matorrales subalpinos y alpinos. Se ha estimado que estos pastos y matorrales podrían sufrir una contracción de su área de distribución potencial del 90 %, según el escenario A2 o del 70% bajo el escenario B2. Las masas propias de zonas húmedas y productivas como los abetales, podrían verse amenazados por episodios de decaimiento debido a la interacción de eventos de sequía, temperaturas elevadas y efectos derivados de la gestión forestal en el pasado (Camarero *et al.*, 2011). En el Pirineo aragonés, el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido está experimentando un proceso de expansión de matorral y bosque a costa de los pastos supraforestales. Este fenómeno se observa a través de la rápida colonización de pino silvestre (*Pinus sylvestris*) en los prados de siega situados a altitudes medias. A mayor altitud esta dinámica ha resultado ser más lenta y se caracteriza por una “densificación” progresiva a lo largo del siglo pasado, inducida por el abandono del pastoreo y favorecida también por el calentamiento climático (Camarero y Gutiérrez, 2004)

Conclusiones

Los estudios disponibles sugieren que los dos motores principales del cambio global (clima y cambios de uso de suelo) conllevan un cambio de gran trascendencia en la composición y estructura de los bosques, en su límite altitudinal y una densificación del paisaje debido en parte a la disminución de la actividad forestal y en parte al abandono de pastos

y prados de siega montanos y subalpinos y posterior recolonización por matorral y bosque. Estos cambios podrían implicar una alteración de la biodiversidad, siendo posiblemente las especies de flora y fauna alpinas, raras y especialistas, las más afectadas al reducirse su habitat por la ascenso de habitats situados actualmente a cotas más bajas. El análisis de la bibliografía científica sugiere, no obstante, una importante variabilidad espacial y temporal en los procesos y se evidencia que los cambios observados no siempre siguen los patrones establecidos.

2.4.2 Alteración de la productividad de los bosques y papel de los bosques como sumideros de carbono

La productividad de una masa forestal se define por el incremento en volumen de la masa arbolada por hectárea. Para crecer y desarrollarse, un árbol necesita luz, dióxido de carbono, oxígeno, agua y nutrientes presentes en el suelo. Esta productividad está igualmente condicionada por un cierto número de factores endógenos propios de la masa (estructura, densidad, composición...) y de la estación (profundidad del suelo, orientación, altitud). En el ciclo natural del árbol, la productividad aumenta rápidamente en los primeros años de desarrollo hasta llegar a un máximo, para disminuir progresivamente en la fase de senescencia (Ryan et al., 1997).

A lo largo del siglo XX y particularmente durante la segunda mitad de siglo, se ha observado un aumento considerable y generalizado en la productividad de los bosques europeos (Spiecker et al., 1996) debido a factores favorables como el aumento de las temperaturas, el aumento de la concentración en dióxido de carbono y la fertilización por nitrógeno derivado de la contaminación antrópica entre otros factores (Nellemann et al., 2001 ; Kahle et al., 2008; Solberg et al., 2009; Bontemps et al., 2011, Bontemps et al., 2012). La llegada anticipada de temperaturas idóneas y un otoño e invierno más suaves modifican el ciclo anual de desarrollo de los árboles, aumentando el periodo vegetativo de los mismos.

Sin embargo, el aumento excesivo de la temperatura en un contexto de disponibilidad hídrica limitada, unido a episodios de sequía más severos y frecuentes, podría llevar consigo impactos negativos sobre el crecimiento de los árboles. Durante estos episodios, algunas especies adoptan estrategias para adaptarse, regulando su fotosíntesis para limitar la evapotranspiración (cerrando los estomas).

En efecto, Soubeyrou et al (2012) han analizado el impacto del cambio climático sobre la ocurrencia de periodos de sequía en Francia, llegando a la conclusión de que *“aunque no haya un aumento de las sequías meteorológicas, se espera un agravamiento de la frecuencia y la intensidad de eventos extremos relacionados con el déficit de humedad en suelo desde la primera mitad del siglo XXI”*.

Algunos estudios ya ponen en evidencia que la ocurrencia de estos eventos extremos asociados a los desajustes del clima, pueden impactar fuertemente en la productividad forestal (temperaturas, sequías mayores, incendios, ataques de patógenos o plagas) (Bréda y Badeau, 2008). En las zonas donde ciertas especies se encuentran ya en el límite de su área de distribución (haya, pino silvestre, y abeto en región mediterránea, por ejemplo) ya se ha constatado un decrecimiento y mayor decaimiento debido en parte al déficit hídrico y a las fuertes temperaturas estivales (Jump et al., 2006; Charru, 2012; Camarero et al., 2015).

Ante este escenario, cabe contar con la capacidad de adaptación de las masas forestales. Así, si el evento perturbador no supera un determinado umbral, la masa forestal en su conjunto puede *“absorber la perturbación sin cambiar de estado”* (concepto de resistencia; Gunderson, 2000 en Charru, 2012) o, después del evento, recuperar a corto o medio plazo su estado anterior a la perturbación (concepto de resiliencia; Dobbertin, 2005). Esta capacidad de resiliencia depende de la duración y frecuencia de la perturbación así como de la especie afectada (Manion, 1981; Dobbertin, 2005 en Charru, 2012).

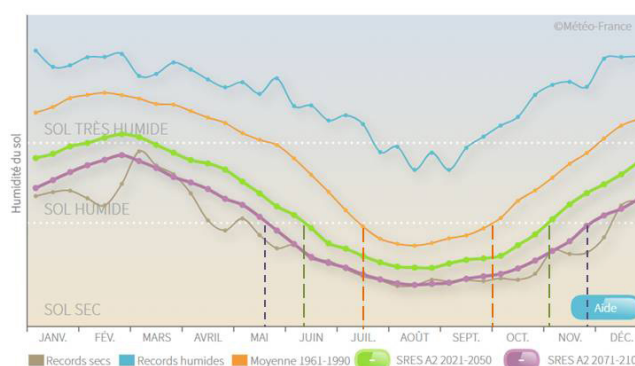


Figura 2.4.3. Ciclo anual de humedad del suelo. Media 1961, records y simulaciones climáticas para los dos horizontes temporales. Fuente: Météo France.

De este modo con una disponibilidad de CO₂ atmosférico equivalente a la actual se pueden destacar, a grandes rasgos, diversas posibles tendencias de la productividad forestal:

- En zonas con aumento de temperaturas pero sin limitaciones hídricas particulares (la evolución de las precipitaciones es particularmente incierta) se puede esperar un posible aumento de la productividad forestal;
- En zonas afectadas por un aumento de las temperaturas y una disminución de las precipitaciones (o al menos una modificación del régimen de lluvias en términos de frecuencia) se puede esperar una disminución de la productividad forestal: esta posibilidad debe equilibrarse con la reserva útil máxima (RUM²⁴) del suelo.
- En todos los casos, la mayor frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos tenderá a debilitar las masas, lo que puede conducir, si los umbrales de tolerancia se superan, a reducir el volumen de madera en pie.

Además del clima, la productividad de los bosques esta fuertemente relacionada con la capacidad de los árboles para captar y acumular dióxido de carbono (CO₂). La captación de CO₂ atmosférico junto con los aportes de agua y la energía de la luz, permite la elaboración de celulosa, azúcares, y otros componentes necesarios para la formación de madera, corteza, raíces y hojas. De este modo, cuanto más se desarrolle el árbol más carbono acumulará (de manera indicativa, se puede considerar que 1 m³ de madera equivale a 1 tonelada de CO₂). La acumulación de carbono en el ecosistema forestal francés - caducifolios, coníferas, madera muerta, y suelos- acumulaba en 2013 fue de 80 millones de toneladas de dióxido de carbono por año, es decir, cerca de una quinta parte de las emisiones nacionales de gases efecto invernadero. Los suelos forestales son particularmente importantes puesto que representan el 57% de CO₂ del ecosistema forestal ellos mismos (Dupouey et al., 2002).

La captación y secuestro de dióxido de carbono por el bosque en el suelo son primordiales en las acciones

de atenuación del cambio climático. No obstante, las incertidumbres sobre los fenómenos resultado del cambio climático pueden impactar al bosque y a su capacidad para captar y acumular el CO₂ son numerosos. También, la gestión forestal y el sector maderero juega un papel importante en la atenuación de los efectos del cambio climático acompañando los bosques en su proceso de adaptación y capacidad de acumular CO₂ en los ecosistemas forestales, al mismo tiempo que proporcionan un material sostenible que permite secuestrar el dióxido de carbono en los productos de madera.

Se han llevado a cabo varios proyectos que pretenden entender y optimizar el papel del sector maderero en la atenuación del cambio climático a través de la acumulación de CO₂.

Un estudio reciente llevado a cabo por el IGN (Instituto Geográfico Nacional) y el INRA (Instituto Nacional de la Investigación Agronómica) (Roux *et al.*, 2017) ha analizado el impacto de 3 escenarios de la política de la extracción forestal sobre el volumen de CO₂ acumulado por el bosque francés, según si se trata de acumulación en el ecosistema forestal o la acumulación resultado de la sustitución energética/materiales y el secuestro de los productos madereros. Los tres escenarios ilustraban el importante papel del sector maderero en la atenuación de las emisiones de gas de efecto invernadero en el horizonte 2050, papel que podría igualmente aumentar.

Por ello, en los tres escenarios se constata un ligero aumento de las capacidades de acumulación de carbono; es la repartición de la acumulación en los compartimentos de carbono forestal que cambia. Este estudio tiene en cuenta tres tipos de perturbaciones asociadas al cambio climático que pueden afectar al bosque (aumento de las temperaturas, tormentas, invasiones biológicas) y su capacidad de acumular carbono. Independientemente de la perturbación, el estudio concluye que *“la capacidad de acumulación de carbono en el sector maderero en el horizonte 2050 es positiva [...] es una gestión activa del recurso que permite amortizar la bajada en la capacidad de la atenuación del sector”*.

(24) La reserva útil máxima del suelo (RUM) representa la cantidad máxima de agua que un suelo puede contener y esta condicionada por numerosos parámetros como la textura, la profundidad de prospección de las raíces, la pedregosidad o la densidad aparente. Este parámetro es un componente inicial para el cálculo de reserva de agua del suelo (RU) que representa el agua que realmente está disponible en el suelo. Fuente: <http://silvae.agroparistech.fr>

2.4.3 El impacto del cambio climático sobre el papel de los bosques en la atenuación de los riesgos naturales

En las zonas de montaña, la probabilidad de que un fenómeno natural se produzca (influenciado por la meteorología específica de ese medio) es más elevada que en cualquier otro medio natural. Los fenómenos naturales propios de montaña se desencadenan clásicamente bajo el efecto de eventos climáticos (precipitaciones de lluvia o de nieve, ciclos de hielo/deshielo, fuertes calores etc.) y se originan en espacios con grandes desafíos socioeconómicos (hábitats, infraestructura, vías de comunicación,...). Es pues la conjunción del fenómeno natural (tipo, intensidad, periodo de retorno...) con la exposición de los elementos amenazados lo que determina el nivel de riesgo natural. Como hemos visto anteriormente, el bosque representa una parte importante de la superficie de los Pirineos. De este modo, en el conjunto de la cordillera, los bosques son dominantes entre 600 y 2.000 m. de altitud (Villiers *et al.*, 2016). El bosque pirenaico juega un papel importante de protección contra los fenómenos naturales que encontramos en el macizo montañoso (avalanchas de nieve, crecidas torrenciales, corrientes de derrubios, desprendimiento de bloques y deslizamientos de terreno). Es capaz de limitar los desprendimientos (fijación de los suelos y de la cubierta de nieve en zonas de desencadenamiento de avalanchas, limitación de los arroyos en superficie...) y de reducir los impactos derivados (frenado, canalización o parada de rocas o avalanchas en pendiente media...).

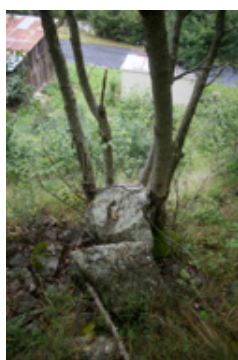


Figura 2.4.4. Bloqueo de una roca por un haya. Fuente: S. Chauvin, FORESPIR

El análisis del impacto del cambio climático en el papel de protección de los bosques integra dos puntos de vista: la dinámica natural de los medios forestales y los riesgos bióticos y abióticos que pueden afectar a medios forestales.

En efecto no todas las formaciones vegetales ni todas las especies forestales protegen del mismo modo contra los riesgos naturales. El cambio climático puede estar influyendo sobre la evolución de la cobertura vegetal, pero puede además conllevar toda una serie de factores que no dependen de la dinámica natural de la vegetación y que conducen a una alteración del papel de protección de los bosques. De este modo la gestión de las masas forestales es clave para evitar el desencadenamiento de fenómenos naturales y limitar la intensidad de los impactos sobre los elementos socioeconómicos de los Pirineos. Las características de la cubierta vegetal de una zona potencialmente expuesta a un fenómeno natural tienen una fuerte incidencia sobre su capacidad para disminuir el riesgo de afectación. A este nivel los dos parámetros importantes que hay que tener en cuenta son los cambios del tipo de vegetación y el cambio de la especie dominante de una masa forestal (Villiers *et al.*, 2016). Por ello, una dinámica forestal estable permite a la masa forestal adaptarse, conservando las mismas especies (debido sobre todo a la diversidad genotípica²⁵ y de la selección natural). En este caso, si la masa forestal juega ya un rol de protección probado (y sin la modificación de fenómenos naturales y desafíos socioeconómicos), el control del riesgo podrá mantenerse. Al contrario, una dinámica forestal regresiva, acompañada de una dinámica herbácea regresiva hacia terrenos poco vegetalizados, modificará profundamente la capacidad de la vegetación para controlar la posibilidad de ocurrencia de un determinado fenómeno. No obstante, son varias las dinámicas que entran en juego y por lo tanto, en la supuesta evolución de estos espacios y sus funciones es imprescindible considerar otros factores como las intervenciones humanas, las poblaciones de animales domésticos o salvajes, y especialmente los grandes ungulados y sus potenciales impactos. En lo que respecta a los posibles cambios de especies dominantes, en un marco de cambio climático se podría tener en cuenta, de manera general, una sucesión de este tipo:

(25) La diversidad genotípica señala la variedad de información llevada por el genoma de un organismo, contenido en cada célula.

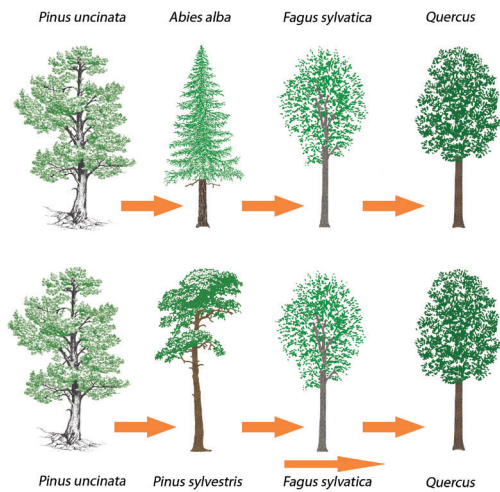


Figura 2.4.5. Tipos de sucesiones posibles de especies bajo el efecto de cambios climáticos en zonas de montaña Pirenaica. Fuente: FORESPIR según Thomas Villiers et al., 2016.

Sin embargo, estas sucesiones potenciales en la dinámica forestal implican la desaparición total de la especie precedente. No obstante existen varios procesos de adaptación, tanto a nivel de individuo (aclimatación o plasticidad fenotípica, relacionada con la adaptación a corto plazo) como a nivel de la masa forestal a más largo plazo (como la adaptación genética) (Rozenberg, 2015). Así el aumento del riesgo asociado a los cambios de la vegetación dependerá, en parte, de la rapidez de los cambios climáticos y del tiempo de adaptación y regeneración disponible para que las especies forestales afectadas cubran los eventuales nichos ecológicos libres (Villiers *et al.*, 2016). Más allá de la evolución natural de la cobertura vegetal, un segundo elemento a tener en cuenta para entender los impactos del cambio climático en los bosques protectores son los riesgos bióticos y abióticos que pueden afectar a los medios forestales. La ocurrencia o intensidad de estos puede estar relacionada con las alteraciones climáticas (tormentas, incendios, sequía, helada, ola de calor) o biológicas (insectos defoliadores o perforadores patógenos, grandes ungulados...) y pueden modificar la capacidad del bosque para reducir los efectos negativos de algunos fenómenos naturales (independientemente de la manera en la que evolucionan estos fenómenos con el cambio climático). Fuera de toda intervención humana, estos dos elementos (dinámica natural y riesgos bióticos y abióticos), íntimamente ligados a evoluciones climáticas, condicionan el papel de los bosques en la atenuación de los riesgos naturales. Con una cubierta forestal suficiente, la composición y la

estructura de las masas influyen en la ocurrencia y la intensidad de un fenómeno natural: por ejemplo, los troncos de las especies caducifolias son más resistentes a los choques y su progresión, en detrimento de las coníferas en las zonas de montaña, podría mejorar el papel protector del bosque con respecto a los desprendimientos de bloques. Por otro lado el avance del área de presencia de resinosos, más allá del piso subalpino, permitiría limitar el desencadenamiento de avalanchas contribuyendo a estabilizar mejor el manto nivoso limitando los inicios de derrumbes. (INTERREG CLIMCHALP, 2008). En cualquier caso, la dinámica natural de las masas forestales de montaña es poco previsible (puesto que depende de una multitud de factores a muy largo plazo). Es por ello que estas evoluciones necesitan ser monitoreadas por parte de los gestores forestales, los cuales pueden mejorar el papel de protección del bosque si intervienen a tiempo en los casos en los que el papel protector del bosque pudiese verse afectado. En un contexto en el que la demanda social con respecto a los bosques de protección no deja de crecer, este papel de protección debería acompañarse por metodologías de diagnóstico y de formulación de recomendaciones para intervenciones silvícolas adaptativas.

ENCUADRE 2.4.1. LA GUÍA DE GESTIÓN DE LOS BOSQUES DE PROTECCIÓN DE LOS PIRINEOS

El proyecto INTERREG POCTEFA 2007-2013 « OPCC1 », permitió crear la “guía de gestión de los bosques pirenaicos de protección”. Este documento técnico tiene como objetivo facilitar a los gestores la identificación de itinerarios silvícolas a poner en marcha en concomitancia de dos factores: la presencia de un riesgo natural confirmado y una disminución de la capacidad de reducir dicho riesgo por parte de la vegetación. Esta guía se aplica al conjunto de los Pirineos andorranos, españoles y franceses y trata de la gestión de los bosques con rol de protección contra los riesgos naturales pero sin un papel productivo.

Su estructura permite al lector

- 1) disponer de información sobre los fenómenos naturales y el papel de la vegetación
- 2) evaluar el nivel de riesgo natural en una zona cruzando los niveles de riesgo y de los elementos en juego,
- 3) evaluar el índice de control de riesgo en las masas forestales del lugar y,
- 4) según el nivel de control, identificar qué acciones deben ponerse en marcha para mantener un nivel de control del peligro suficiente por las masas forestales.

2.4.4 Alteración de las condiciones de salud de los bosques y posible desequilibrio con las comunidades de agentes patógenos

Desde hace siglos, el hombre se ha interesado por el estado sanitario de los árboles y bosques, puesto que la madera y los productos forestales han sido un recurso esencial para su subsistencia (alimentación y calor) y desarrollo (construcción, química verde). Más tarde, a comienzos de los años 80, diferentes fenómenos bióticos (ataques de agentes patógenos...) o abióticos (sobre todo climáticos) condujeron a un deterioro progresivo del estado sanitario de algunos bosques en Europa. Estos fenómenos suscitaron una preocupación general en la sociedad ante la cual los gestores propusieron métodos de seguimiento de los ecosistemas forestales.

La red europea de seguimiento sistemático de ecosistemas forestales

Además de otras metodologías, en los años 80 se creó una red estructurada de seguimiento del estado sanitario de los bosques. Varios países europeos se dotaron contemporáneamente de esta red, a través de los dispositivos nacionales similares de cada país que se estructuró en una red europea de seguimiento sistemático de ecosistemas forestales (Nageleisen y Taillardat, 2016).

De este modo, desde hace unos veinte años se evalúa cada año el estado sanitario de los árboles en más de 5000 parcelas en toda Europa.

La red distingue dos niveles de seguimiento en función de la complejidad y de la exhaustividad de los parámetros empleados para el mismo:

- Nivel I: seguimiento estadístico sistemático de las parcelas implantadas en los nexos de una malla cuadrada de 16 km de lado;
- Nivel II: seguimiento más preciso de ciertas parcelas experimentales de un conjunto de parámetros dendrométricos²⁴, sanitarios, ecológicos, estacionales, meteorológicos...con el fin de comprender la influencia de unos parámetros con otros.

Zoom sobre la cordillera pirenaica

En el conjunto de la cordillera pirenaica existen 168 parcelas con datos de la red europea (Rouyer *et al*, 2014). Estas parcelas permiten sintetizar cada año el estado sanitario de los árboles (con mediciones de decoloración foliar, mortalidad de ramas y mortalidad de árboles) en las parcelas permanentes y poner en evidencia las tendencias regionales o a nivel de cada especie. Debido a los cambios recientes en los protocolos de seguimiento sobre la decoloración foliar y la mortalidad de las ramas, las bases de datos comparables se remontan a 2011 únicamente y no permite identificar tendencias significativas

	Nivel I	Nivel II	Total
Andorra	11	3	14
España	98	4	102
Francia	45	7	52
Total	154	14	168

Tabla 2.4.1. Repartición de las parcelas de la red europea de seguimiento de los ecosistemas forestales en los Pirineos.

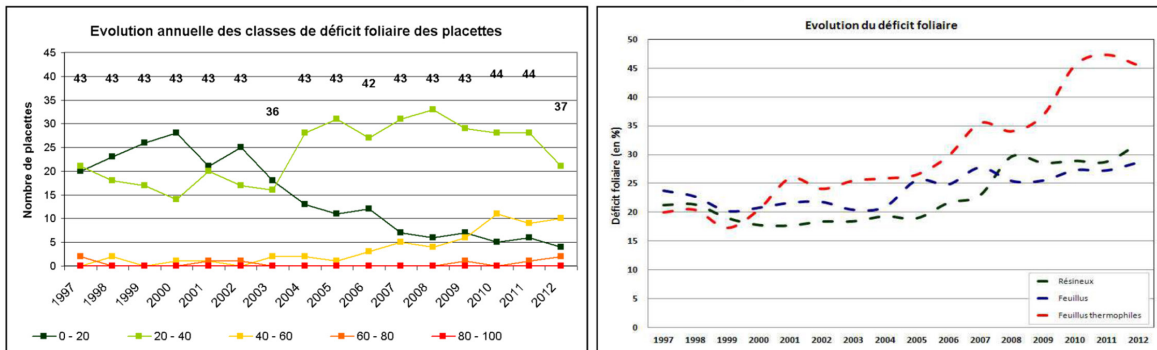
(24) Los parámetros dendrométricos designan las características físicas medibles y cuantificables de los árboles (como el diámetro, la circunferencia, la altura, el volumen, la edad...) y de las poblaciones forestales (como la densidad, la altura media, el volumen medio, el área basal, el crecimiento medio...)

con respecto a la evolución de estos parámetros. El parámetro más adaptado como indicador de los efectos del cambio climático en las masas forestales es el déficit foliar. En efecto, en una situación de estrés los árboles pierden una parte de su ramificación. Las ramificaciones pueden regenerarse (resiliencia) a través del desarrollo de yemas latentes²⁷, gracias a condiciones climáticas más favorables (Drenou, 2012). Existe una base de datos importante que registra este parámetro desde 1997 en la Red Europea de seguimiento sistemático de los ecosistemas forestales. La puesta en valor de estos datos ha permitido, por una parte, estudiar las evoluciones temporales de las especies, y por otra parte identificar las diferencias espaciales potenciales en la reacción de los ecosistemas forestales (Rouyer et

al., 2014). Se pueden destacar algunas tendencias en base a los análisis realizados en el marco del proyecto INTERREG POCTEFA "OPCC1" sobre los datos disponibles en las parcelas de la red europea (OPCC-CTP, 2013). Aunque la tasa de mortalidad de los árboles es baja (inferior a 0,5% anual a excepción del 2004 tras los ataques de los escolítidos²⁸ posteriores a la sequía del 2003), algunos signos de degradación comienzan a ser perceptibles tales como el déficit foliar y mortalidad de las ramas en la parte superior de las copas (Goudet, 2015). En efecto, según los datos del Departamento de Salud de los Bosques (DSF), el déficit foliar tiende a aumentar sobre todo en la zona mediterránea (Maaf y IGN, 2016) pero también en la zona mediterráneo-pirenaica (Rouyer et al., 2014; Goudet, 2015).

France

Données du réseau systématique européen
(France : DSF, Espagne : SSF, Andorre : DMA)



Espagne

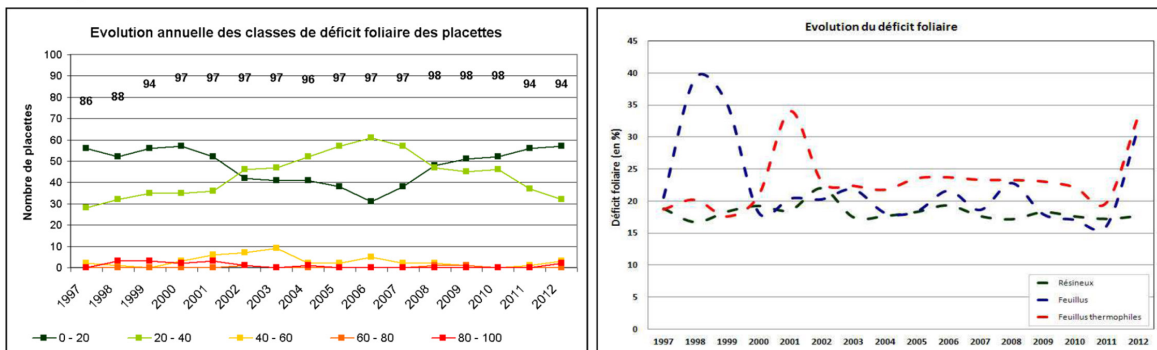


Figura 2.4.6. Evolución y tendencias del déficit foliar (periodo 1997-2012) diferenciadas por país y por grupo de especies a partir de la base de datos de la red europea. Fuente: Rouyer et al., 2014.

(27) Yema que no se desarrolla el año de su formación y que puede quedar en estado vegetativo o desarrollarse tras un evento.

(28) Los escolitinos indican diversas especies y géneros de coleópteros xilófagos que participan en la descomposición de la madera muerta pero que pueden, igualmente atacar varias especies de árboles vivos y causar daños importantes que pueden llevar a la muerte del árbol.

Este aumento parece iniciarse en el año 2000 y apunta a una extensión del fenómeno en los bosques termófilos frondosos tanto de especies perennes como la encina (*Quercus ilex*), y alcornoque (*Quercus suber*), como de especies caducifolias como el roble pubescente (*Quercus pubescens*) e incluso el castaño (*Castanea sativa*). Este hecho pone en evidencia para el mismo periodo, un déficit foliar similar para el roble albar (*Quercus petraea*) o roble carballo (*Quercus robur*) y un ligero aumento en las coníferas: picea común (*Picea abies*), abeto (*Abies alba*), abeto douglas (*Pseudotsuga menziesii*) y pino marítimo (*Pinus pinaster*) (Maaf-IGN, 2016).

Por otra parte, la red de observaciones del estado sanitario de los bosques permite localizar la aparición y el impacto de los diferentes insectos devastadores o plagas. Así se ha constatado desde 1989 un impacto creciente de patógenos como *Diplodia sapinea* (*Sphaeropsis sapinea*) en los pinos después de episodios de sequía y tormentas de granizo.

El seguimiento de ciclos de insectos defoliadores muestra que los picos de defoliación son a veces acentuados por las condiciones climáticas, como es el caso de la procesionaria del pino (*Thaumetopoea pityocampa*). Otro ejemplo, el aumento en la presencia de la enfermedad de bandas rojas (*Dothistroma septospora*) limita las plantaciones de pino laricio a la parte oeste de la cadena de los Pirineos. Finalmente, merece especial atención el fenómeno de la llegada de plagas exóticas,

como por ejemplo el nematodo de la madera del pino (*Bursaphelenchus xylophilus*) que es actualmente objeto de un plan de seguimiento a nivel europeo.

Temores y perspectivas

Los factores explicativos más destacados son la variabilidad del aporte hídrico anual del año en curso y los dos años precedentes: en particular las precipitaciones acumuladas y la diferencia entre estas y la evapotranspiración (Ferretti *et al.*, 2014 en Maaf-IGN, 2016). Esto confirma el papel preponderante del cambio climático y su impacto en los ecosistemas forestales a largo plazo cuando el régimen de las precipitaciones y de temperaturas tiende a cambiar. Más allá del deterioro sanitario de los árboles, un aumento del fenómeno del decaimiento podría incidir de manera significativa en la mortalidad de las especies menos adaptadas y por consiguiente, desembocar en alteraciones de la composición florística de los ecosistemas, con "migración" de las áreas de distribución hacia el norte o en altitud (Bertrand *et al.*, 2011).

Es necesario mencionar que la variabilidad genética de los árboles puede ser una ventaja importante frente al cambio climático y que a través de la gestión forestal pueden anticiparse las alteraciones esperadas, y en particular a través de prácticas adecuadas de silvicultura y la selección de las especies más adecuadas en las futuras intervenciones forestales.

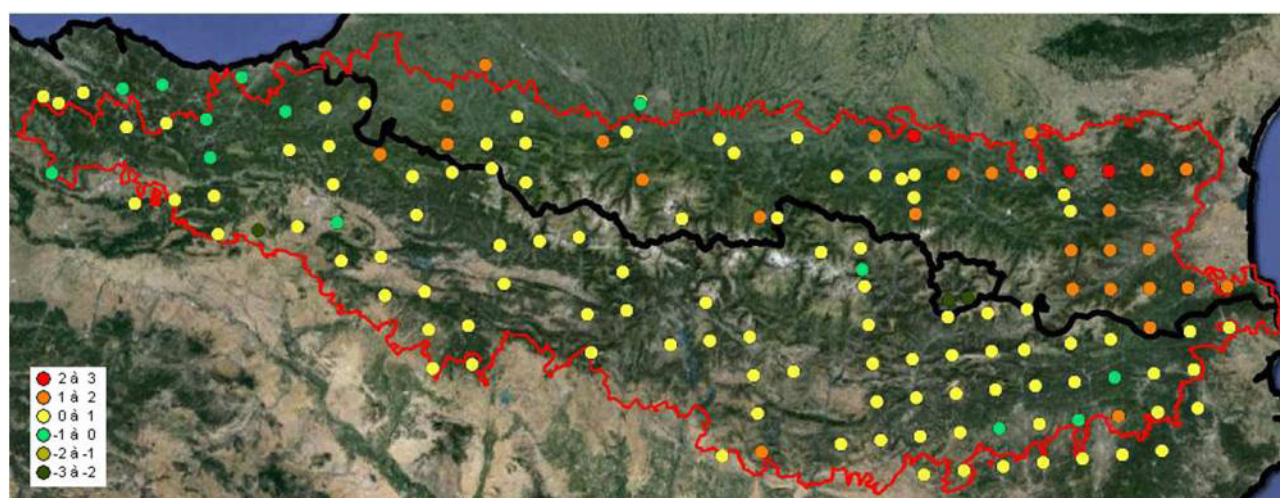


Figura 2.4.7. Coeficiente de la pendiente de la regresión lineal del déficit foliar (período 1997-2012) en las parcelas de la red europea. Fuente: Rouyer *et al.* 2014.

ENCUADRE 2.4.2. ARCHI, UN NUEVO MÉTODO DE DIAGNÓSTICO SANITARIO BASADO EN EL ANÁLISIS DE LA ARQUITECTURA DE LOS ARBOLES.

El decaimiento de los árboles no siempre es irreversible. El método ARCHI basa su diagnóstico en la capacidad de recuperación de los árboles afectados a partir de la caracterización y la observación de diferentes reacciones fisiológicas arquitecturales. Se desarrolla desde hace algunos años por el Instituto para el Desarrollo Forestal (IDF) en colaboración con el CIRAD (Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agronómica) y el DSF (Departamento Salud de los Bosques).

Su principio se basa en realizar dos series de observaciones. La primera atañe los síntomas de degradación de la copa (ramificación empobrecida, mortalidad); la segunda trata sobre los procesos de restauración de la copa, en particular el desarrollo de botes chupones. El estudio de la relación de fuerzas entre estos procesos antagonistas -degradación y restauración- permite llevar a cabo un diagnóstico del estado de salud del árbol. Por motivos de simplificación, el número de resultados posibles del análisis se ha limitado a cinco: árbol sano, árbol estresado, árbol resiliente, árbol con segunda copa, y árbol con decaimiento irreversible (Lebourgeois *et al.*, 2015)

El método ARCHI se declina especie por especie. Hoy en día, son varias las especies que se benefician de las claves de determinación ARCHI (*Quercus robur*, *Quercus petraea*, *Quercus pubescens*, *Abies alba*, *Pseudotsuga menziesii*, *Castanea sativa*) y se desarrollarán y traducirán al castellano nuevas claves ARCHI en el marco del proyecto INTERREG POCTEFA CANOPEE (*Fagus sylvatica*, *Pinus sylvestris*, *Pinus uncinata*, *Pinus nigra subsp. salzmannii*).

2.4.5 Impacto del cambio climático sobre el riesgo de incendios forestales en los Pirineos

La ocurrencia y propagación de grandes incendios depende de la existencia de igniciones: volumen y continuidad de combustible y de la humedad de este. Tradicionalmente la región pirenaica no se ha visto afectada por grandes incendios, al ser las condiciones climáticas propias de los medios de montaña y la humedad de combustibles derivadas de las mismas un factor limitante para su ocurrencia. Por ejemplo, en Cataluña se ha observado un límite altitudinal de aproximadamente 700 m s.n.m. a partir del cual la probabilidad de incendios forestales decrece drásticamente (Gonzalez *et al.*, 2006). En cambio, el

número de igniciones en determinadas épocas del año y la continuidad y volumen de combustible en la región pirenaica es similar o incluso superior al de zonas mediterráneas colindantes, si bien el número de igniciones naturales causadas por rayos, han sido superiores (González-Olabarria *et al.*, 2015).

Actualmente, una gran parte de los incendios en los Pirineos suelen estar asociados a actividades relacionadas con la mejora de pastos (González-Olabarria *et al.*, 2015). El abandono de las actividades agropastorales durante el siglo XX, acaecido principalmente en las zonas de montaña marginales ha dado lugar a una matorralización de los pastos de media y alta montaña y a una densificación de los bosques (Améztegui *et al.* 2010), aumentando la cantidad y continuidad del combustible.

Como el factor que determina la activación y la propagación de un fuego es la humedad del combustible, el incremento de la temperatura con el cambio climático y, sobre todo, una mayor duración del periodo de sequía estival puede acrecentar el riesgo de incendios al aumentar la disponibilidad del combustible, aumentando la frecuencia de años “de riesgo” (Moriondo *et al.*, 2006).

Actualmente, gran parte de los incendios en alta montaña ocurren durante el invierno, cuando los fríos invernales han secado la hierba y los matorrales. Se prevé que una continentalización del clima de los Pirineos, con una disminución de la cubierta de nieve, podría aumentar el riesgo de ocurrencia y propagación de grandes incendios. Aunque no se puede asegurar que el régimen de incendios se vaya a equiparar al de áreas limítrofes, más mediterráneas, la ocurrencia de incendios de verano, más extensos y severos, no se podrá descartar en el futuro (Figura 2.4.7).

La vegetación de los Pirineos, en comparación con la mediterránea, no ha coevolucionado con fuegos devastadores. Actualmente, la mayoría de incendios en los Pirineos son de superficie y de rápida propagación, con escasa afectación sobre el banco de semillas y el suelo. Aunque el conocimiento de la respuesta de las especies típicas de los Pirineos (vegetales y animales) a incendios severos es escaso, es previsible que el aumento de la severidad de los incendios tenga un impacto significativo en la estructura y composición de la vegetación, incrementando la erosión en zonas de vertiente y el riesgo de avalanchas y crecidas. La extensión probable de grandes incendios podría implicar una reducción de la superficie de bosque y, consecuentemente, una homogeneización del paisaje. Esto tendría sin lugar a dudas un efecto negativo en la biodiversidad, la protección contra los riesgos naturales,

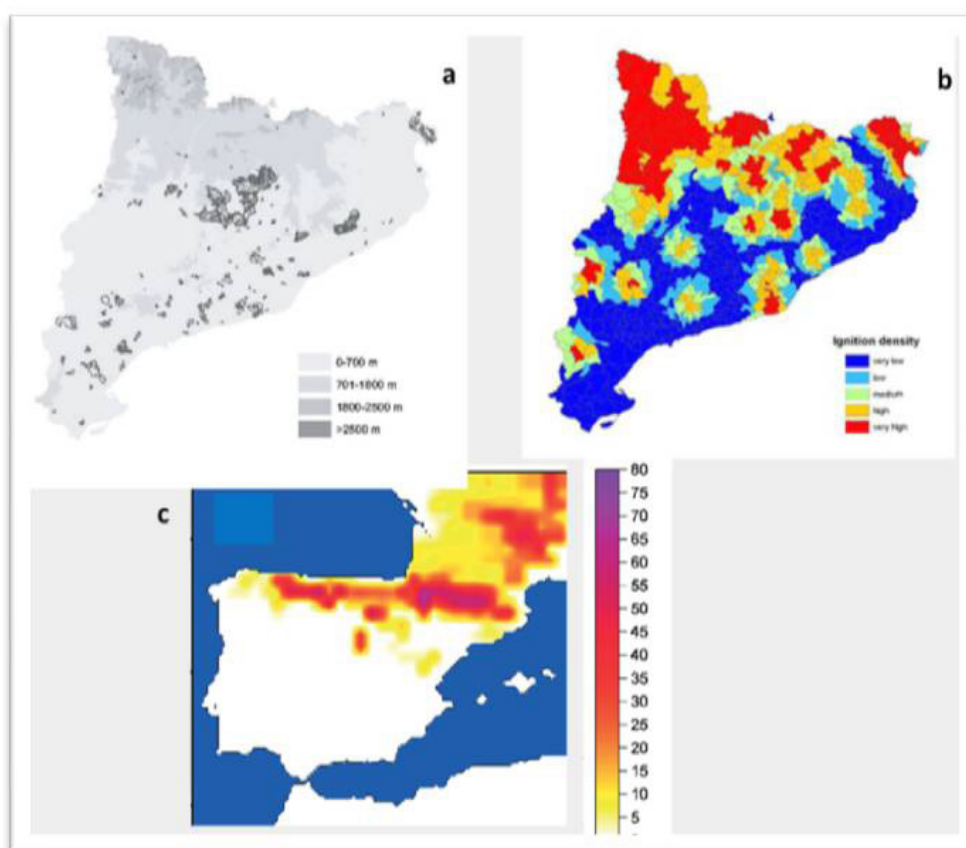


Figura 2.4.8. El régimen de incendios en zonas del Pirineo (ej. Cataluña), viene definido por el régimen de precipitaciones (a: Gonzalez y al., 2006), y las actividades agropecuarias que definen la abundancia de igniciones en invierno (b: densidad de igniciones causadas por quema de pastos, en Gonzalez-Olabarria et al., 2015). Pero estos factores se pueden ver modificados por la mayor recurrencia de años “de riesgo de incendio” (c: porcentaje de cambio en el número de años con riesgo de incendio alto para un escenario de cambio climático B2, según Moriondo et al., 2006).

belleza paisajística, y por lo tanto en el turismo de aquellas zonas afectadas (ver capítulo 3.1). Otro aspecto a tener en cuenta es la percepción del riesgo por parte de turistas potenciales. Si bien el impacto del riesgo de incendios no se ha estudiado en profundidad en Europa, en Estado Unidos se ha observado una relación directa entre el aumento de los incendios durante un año, la disminución en afluencia de visitantes y las pérdidas económicas para el sector hotelero (Thapa *et al.*, 2004).

La lucha contra los incendios en los Pirineos requiere una mejora de la predicción del riesgo y del comportamiento de un posible fuego y una gestión activa del combustible en zonas clave para su extinción (Encuadre 2.4.3). La meteorología en zonas de montaña es muy variable y, en general, se dispone de escasa información sobre su variabilidad espacial.

Consecuentemente, la fiabilidad de la predicción meteorológica es muy baja a escala de detalle. El uso tradicional del fuego ha sido desde siempre un instrumento para mejorar los pastos y modificar la distribución y composición de la vegetación en los Pirineos (Montané *et al.*, 2009). La actividad agrícola en el pasado y el pastoreo hasta la actualidad ha conformado el paisaje en mosaico característico de muchos de los valles y alta montaña de los Pirineos. La conservación del paisaje y, consecuentemente, la disminución del riesgo de incendio pasan por un aumento de la rentabilidad de las actividades agro-ganaderas y silvícolas existentes en las zonas de montaña, principalmente a partir de un reconocimiento y valorización de la calidad de sus productos. Además, la lucha contra los incendios requiere la gestión activa en zonas clave para evitar la propagación y disminuir la severidad de grandes incendios forestales (Casals *et al.*, 2009).

2.4.6 Conclusiones y recomendaciones

El macizo de los Pirineos dificulta la migración de especies características de montaña en respuesta al cambio climático (limitando el desplazamiento de especies del sur hacia el norte) debido a su disposición este-oeste y al entorno de tierras extensas a baja altitud. A pesar de ello, existen pocos estudios específicos sobre los impactos del cambio climático en los bosques pirenaicos que integren el conjunto del gradiente Este-Oeste y Norte-Sur. Actualmente se está trabajando intensamente desde del Observatorio Pirenaico de Cambio Climático para desarrollar y proveer este tipo de información. En los Pirineos, el bosque está en estrecha relación con la sociedad rural y los numerosos desafíos socio-económicos, directamente relacionados con la evolución de los medios naturales y los factores que los condicionan. El cambio climático, modificando las temperaturas y los regímenes de precipitaciones altera el régimen de perturbaciones tanto de orden biótico (plagas, enfermedades) como abióticas (incendios, vendavales) y por tanto genera un fuerte impacto en la dinámica y funcionamiento de los ecosistemas forestales. No se pueden omitir tampoco otros factores que tienen efectos a corto plazo como la presión cinegética (un verdadero reto para la regeneración), la disminución de la actividad pastoral tradicional o simplemente la gestión forestal con objetivos de producción de madera. Cambios en la estructura, en la composición, en el estado sanitario, en las áreas de repartición geográfica y en la vulnerabilidad de los fenómenos exteriores (patógenos, fenómenos climáticos...) son otros de tantos efectos (positivos o negativos) que conviene anticipar puesto que condicionan la evolución de la cubierta vegetal pirenaica y podrán inducir modificaciones importantes en todas las componentes de la multifuncionalidad de nuestro bosque de montaña.

Predecir la respuesta de los bosques frente el cambio climático es un ejercicio complicado e incierto que requiere un volumen importante de conocimientos sobre todo dado que éstas no son lineales ni se dan tan rápidamente como pensábamos en un principio..

Principales desafíos

El bosque y la gestión forestal deben ser percibidos como un proceso a largo plazo. Las decisiones tomadas

hoy condicionaran nuestros bosques de mañana. Así, con el fin de aumentar la resiliencia de los bosques pirenaicos frente a los efectos negativos del cambio climático conviene:

- Mejorar los conocimientos a escala pirenaica de los efectos e impactos del cambio climático en los bosques, (en particular los más vulnerables a medio y corto plazo) y los procesos de adaptación (naturales o antrópicos)
- Mantener y desarrollar actividades agrícolas, pastorales y silvícolas en las zonas de montaña, pues garantizan una gestión sostenible de estos medios con múltiples efectos: disminución del volumen y de la continuidad de los combustibles, mosaico de hábitats mas resiliente, limitación de riesgos y crecimiento de la resiliencia de los bosques en caso de accidentes sanitarios o climáticos...
- Favorecer la transmisión de conocimientos y avances técnicos y científicos a destinación de públicos no especialistas.

Los actores pirenaicos, entre los cuales se encuentran los propietarios forestales, los científicos, los gestores, y los poderes públicos, deben actuar desde hoy con urgencia para promover la adaptabilidad de los bosques y su evolución en las mejores condiciones posibles.

Recomendaciones

Medidas suaves ²⁹(medidas comportamentales y mejora de conocimiento)

- Experimentar y dar a conocer diferentes modelos de gestión forestal adaptativa para aumentar la capacidad de resiliencia de los bosques frente a eventos climáticos desfavorables repetidos e/y extremos.
- Perennizar y desarrollar una red de observadores de la evolución fenológica de los bosques pirenaicos (periodos de brote).
- Promover sinergias entre los diferentes procesos de observación y seguimiento (teledetección, ciencias participativas...).

(29) Las medidas Soft o medidas no estructurales para reducir o paliar los efectos negativos del cambio climático. Esta categoría de medida está típicamente representada por los estudios de investigación enfocados a cubrir lagunas de conocimiento o para enriquecer las bases de conocimiento sobre el cambio climático, sus impactos y los sectores más vulnerables. También entra en esta categoría el desarrollo de metodologías y sistemas específicos para reducir riesgos derivados del cambio climático (ej. Desarrollo de un early warning System transfronterizo para la gestión de las olas de calor en el Macizo).

- Avanzar en los conocimientos y la experimentación sobre la variabilidad genética de los árboles con el fin de anticipar las alteraciones potenciales adaptando desde ahora la silvicultura y la elección de especies para las intervenciones forestales de los próximos años.

- Identificar y valorar las posibles pérdidas de especies y hábitats forestales vulnerables al cambio climático para evaluar el empobrecimiento genético en zonas de montaña

- Promover el desarrollo de un dispositivo de vigilancia, de alerta y de respuesta operativa frente a las plagas forestales y las patologías que pueden afectar los bosques del Pirineo.

- Mejorar el conocimiento de los impactos del cambio climático en el conjunto de los ecosistemas forestales

- Comunicar a nivel del público en general y los políticos locales sobre las interacciones entre el bosque y el cambio climático (impactos potenciales, utilidad, adaptación...) y sobre el rol que tienen los gestores.

- Mejorar las capacidades de previsión del riesgo de incendio desarrollando un índice adaptado a las especificidades de la cordillera (vegetación, meteorología, topografía...).

- Afinar los conocimientos sobre las zonas de compatibilidad climática en las áreas de distribución potencial de los bosques pirenaicos para identificar las zonas más vulnerables y de ese modo, orientar a los propietarios y gestores en las decisiones silvícolas.

- Asesorar a los propietarios forestales para favorecer las especies adaptadas a las estaciones que satisficieran las necesidades en materia de disponibilidad de nutrientes, oxígeno y agua.

Medidas verdes ³⁰ (limitar impactos negativos del Cambio Climático a través de la utilización de bienes y servicios o recursos naturales)

- Reforzar y apoyar la gestión forestal sostenible para disminuir la vulnerabilidad de los bosques frente a perturbaciones naturales: favorecer una silvicultura

MENSAJE CLAVE

- Los bosques pirenaicos proporcionan múltiples bienes y servicios: producción de madera y otros productos forestales, captación y acumulación de CO₂, protección frente a riesgos naturales, conservación de la biodiversidad, uso público...

- El cambio climático tendrá un fuerte impacto en el funcionamiento de los bosques del Pirineo debido al aumento de las temperaturas y los cambios en el régimen de precipitaciones (alargamiento del período vegetativo, cambios de productividad, modificaciones de la distribución de las especies...). El cambio climático puede también tener consecuencias no deseadas sobre los bosques pirenaicos (incendios, plagas, patógenos, tormentas...)

- Además del efecto del cambio climático existen otros componentes del cambio global (uso del suelo, prácticas...) que impactan fuertemente la dinámica y funcionamiento de los bosques pirenaicos. La gestión forestal es una herramienta fundamental de la adaptación de los bosques al cambio climático: "Mediante la acción de hoy el forestal prepara el bosque de mañana".

dinámica con el objetivo de minimizar los riesgos de accidente y promover la resiliencia de las masas.

- Promover la utilización de madera local (transformada localmente) como material: ello garantiza un secuestro de carbono seguro y permite substituir la utilización de materiales de mayor impacto de efecto invernadero.

- Promover la utilización de biomasa local para substituir energías que emiten gases de efecto invernadero (el impacto de carbono de la combustión de la madera es nulo porque libera CO₂ que ha sido acumulado por el árbol a lo largo de su desarrollo)

- Optimizar la gestión de los medios naturales de las zonas expuestas a los riesgos de incendio promoviendo una gestión activa (sobre todo silvicultura y agro pastoral) para limitar el volumen y la continuidad de combustibles.

(30) Las medidas verdes o basadas en los servicios ecosistémicos: esta tipología de medida incluye todas las medidas, buenas prácticas, estudios o iniciativas que tengan como principio el uso de los servicios ecosistémicos procurados por los distintos recursos naturales para paliar los efectos negativos del cambio climático (ej. prácticas silvícolas conservativas para incrementar la capacidad de los bosques del pirineo para reducir los riesgos hidrogeológicos).

2.5. Ecosistemas sensibles de alta montaña: lagos y turberas

Coordinadores: Blas Valero Garcés (IPE-CSIC)

Autores y Coautores: David Amouroux (U. Pau- Pays de L'Adour), Laure Gandois (Laboratoire EcoLab, CNRS, UPS, INPT), Didier Galop (Laboratoire EcoLab, CNRS, UPS, INPT), Gaël Le Roux (Laboratoire EcoLab, CNRS, UPS, INPT), Lluís Camarero (CEAB-CSIC), Jordi Catalán (CREAF-UAB), Jesús Miguel Santamaría (U. Navarra), David Elustondo (U. Navarra), Alberto de Diego (UPV-EHU), Ana Moreno (IPE-CSIC) Fernando Barreiro – Lostres (IPE-CSIC), Pilar Mata-Campo, (IGME), Pablo Corella (IFQSH-CSIC) Penélope González – Sampériz (IPE-CSIC), Anna Avila Castells (CREAF-UAB), Olaia Liñero, (UPV-EHU), Marisol Felip (U. Autónoma Barcelona),

2.5.1. Características de los lagos y turberas pirenaicos

Los lagos y turberas de alta montaña en los Pirineos son elementos icónicos del paisaje pirenaico, vulnerables a los recientes cambios climáticos y la creciente presión antrópica. Más de mil lagos de alta montaña (más de 0.5 ha en los pisos alpino y montano), la mayoría entre 2000 y 2500 m de altitud, han sido inventariados en los Pirineos en función de distintos criterios de extensión y altitud (Castillo-Jurado, 1992). Los 17 lagos mayores (con un área mayor de 0.3 km²) suman una superficie de 7.87 km². De acuerdo con el inventario de Castillo-Jurado (1992), el 75% de los lagos tiene una superficie de menos de 0.04 km² y el área de la cuenca de drenaje varía entre 0.1 km² (Gentianes, Gave de Pau) y 32.6 km² (Baños de Panticosa, Gállego), con una media de 1.67 km². Con respecto a la profundidad, se distinguen dos tipos, los relativamente someros (< 10-15 m de profundidad máxima) y los profundos (> 15 m). En total existen 90 lagos con profundidades mayores de 25 m, de los cuales 47 superan los 40 m.

Las turberas son ecosistemas que se caracterizan por la acumulación de materia orgánica derivada de la vegetación en condiciones de saturación de agua. En los Pirineos, la mayoría son de tipo “fen”, alimentadas por precipitación, aguas superficiales y/o subterráneas. Su formación depende de la topografía y las condiciones climáticas e hidrológicas. La mayoría de las turberas pirenaicas se generaron después de la última deglaciación y han continuado acumulando materia orgánica hasta la actualidad. No existe un inventario completo de las turberas de los Pirineos, aunque son menos numerosas que en otras montañas

RESUMEN

Los lagos y turberas de alta montaña son elementos icónicos del paisaje de los Pirineos muy vulnerables al cambio climático y la creciente presión antrópica. Durante milenios, han sostenido una compleja biodiversidad y cumplido una función de almacenamiento de carbono, además de proporcionar recursos hídricos, hábitats para el pastoreo y más recientemente recursos para el turismo. Su conservación en el marco de un desarrollo sostenible de la montaña es un reto y una oportunidad para concienciarnos de los efectos del cambio global en territorios considerados prístinos.

de clima más atlántico (Heras *et al.*, 2017). En particular, la información sobre las turberas pequeñas (menos de 1 ha) es muy limitada, a pesar de ser más abundantes, especialmente a mayores alturas, asociadas a pequeños lagos alpinos. Turberas bien desarrolladas ocurren en los Pirineos navarros (Atxuri, Belate, Gesaleta y Baltsagorrieta) y en la vertiente francesa (Bernadouze y Col d'Ech). Los datos existentes sobre el espesor de turba acumulada en estos ecosistemas en los últimos miles de años se limitan a unos pocos sitios, de manera que no se dispone de estimaciones fiables del reservorio de carbono acumulado en las mismas. La dinámica de estos ecosistemas originados por los procesos glaciares del Cuaternario está fuertemente condicionada por los procesos criosféricos en las cuencas de drenaje (innivación y fusión de la nieve, dinámica asociada de los neveros y del permafrost). Las características de estos lagos y turberas (elevada altitud y radiación solar con altas dosis de UV, ultraoligotrofia debido a la escasez de nutrientes, aguas muy diluidas, bajas temperaturas, presencia de una capa de hielo durante varios meses, etc.) los hacen muy sensibles a factores climáticos (regímenes de temperaturas y precipitaciones, vientos, etc) (Figura 2.5.1). Por una parte son “centinelas” de los cambios que están sucediendo en el territorio pirenaico, dada su gran sensibilidad a las fluctuaciones climáticas y ambientales y a las alteraciones de sus cuencas de recepción. Por otra parte archivan en sus sedimentos las complejas señales del paisaje, el sistema acuático y los procesos biológicos y abióticos y cómo han evolucionado en los últimos siglos o milenios.

Los lagos y turberas proporcionan servicios al territorio pirenaico más allá de su carácter de indicadores del cambio global. Durante las últimas décadas, la economía de muchas zonas de montaña se ha vuelto cada vez más dependiente de las actividades turísticas relacionadas con los deportes de invierno y con el

excursionismo de verano. Algunos de los elementos singulares de la alta montaña como glaciares, ibones, turberas y ecosistemas de tundra alpina son elementos dinamizadores de las economías locales, con variadas figuras de protección y medidas de conservación en los distintos territorios pirenaicos. Dada la gran importancia de los recursos hídricos de alta montaña y de estos elementos singulares del paisaje para múltiples sectores (turismo, agricultura, generación de energía, medio ambiente, suministro de agua, etc.), la calidad de los servicios proporcionados por lagos y turberas en el futuro dependerá directamente de las respuestas de la criosfera-hidrosfera- biosfera al cambio climático en el territorio pirenaico. La alta montaña es el granero de agua, la fábrica de energía y el patio de recreo de todos los territorios pirenaicos, una región con crecientes necesidades de agua y recursos energéticos para consumos agrícolas y humanos.

2.5.2. Procesos en lagos y turberas de alta montaña en un contexto de cambio climático

Los procesos biogeoquímicos en los lagos y turberas de alta montaña están determinados por el carácter extremo de estos hábitats (Catalan *et al.*, 2006).

Agencias territoriales, confederaciones hidrográficas y ministerios de España, Francia y Andorra mantienen programas de análisis para comprobar el estado ecológico de algunos lagos en los Pirineos (ver CHE³¹ y ACA³².) Las aguas de alta montaña son en general muy diluidas, con muy bajo contenido en sales disueltas, oligotróficas y con una elevada transparencia. El tipo de cuenca y el sustrato geológico son determinantes de la composición química de las aguas (formaciones carbonatadas versus silíceas) y del ciclo del carbono (presencia de carbono orgánico disuelto asociado a la abundancia de suelos en la cuenca). Los ciclos biogeoquímicos están fuertemente controlados por el sustrato (alcalinidad, ciclo del carbono), la micro- y macrobiota (nutrientes) y por la deposición atmosférica (nutrientes, contaminantes). En particular, el pH de las aguas es uno de los parámetros que controla la presencia de algunas microalgas y macrófitas. El pH depende de la alcalinidad y está relacionado con el sustrato de la cuenca (Catalan *et al.*, 2006).

De acuerdo con un estudio llevado a cabo en verano del año 2000 (Catalan *et al.*, 2006), el 70 % de los lagos pirenaicos son ultraoligotróficos (TP < 4.7 µg L⁻¹), el 22 % oligotróficos (4.7 < TP < 9.3 µg L⁻¹) y el 6 % son mesotróficos (9.3 < TP < 31 µg L⁻¹). Durante

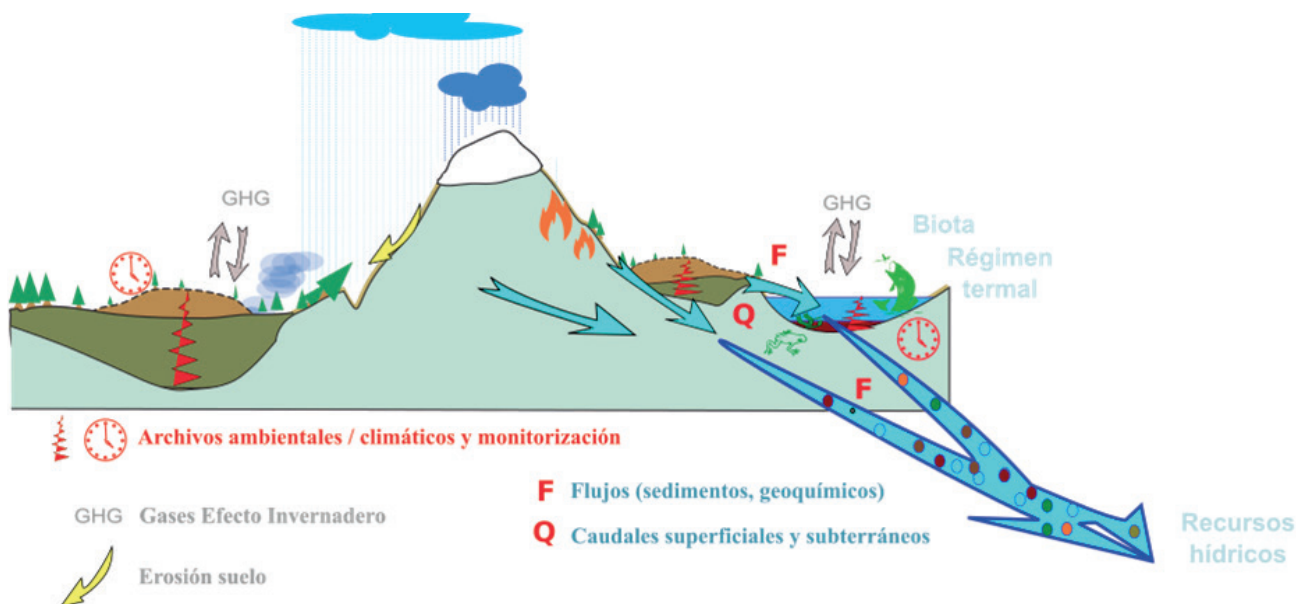


Figura 2.5.1. Ciclos biogeoquímicos en lagos y turberas de alta montaña

(31) <http://www.chebro.es/>

(32) <http://aca-web.gencat.cat/>

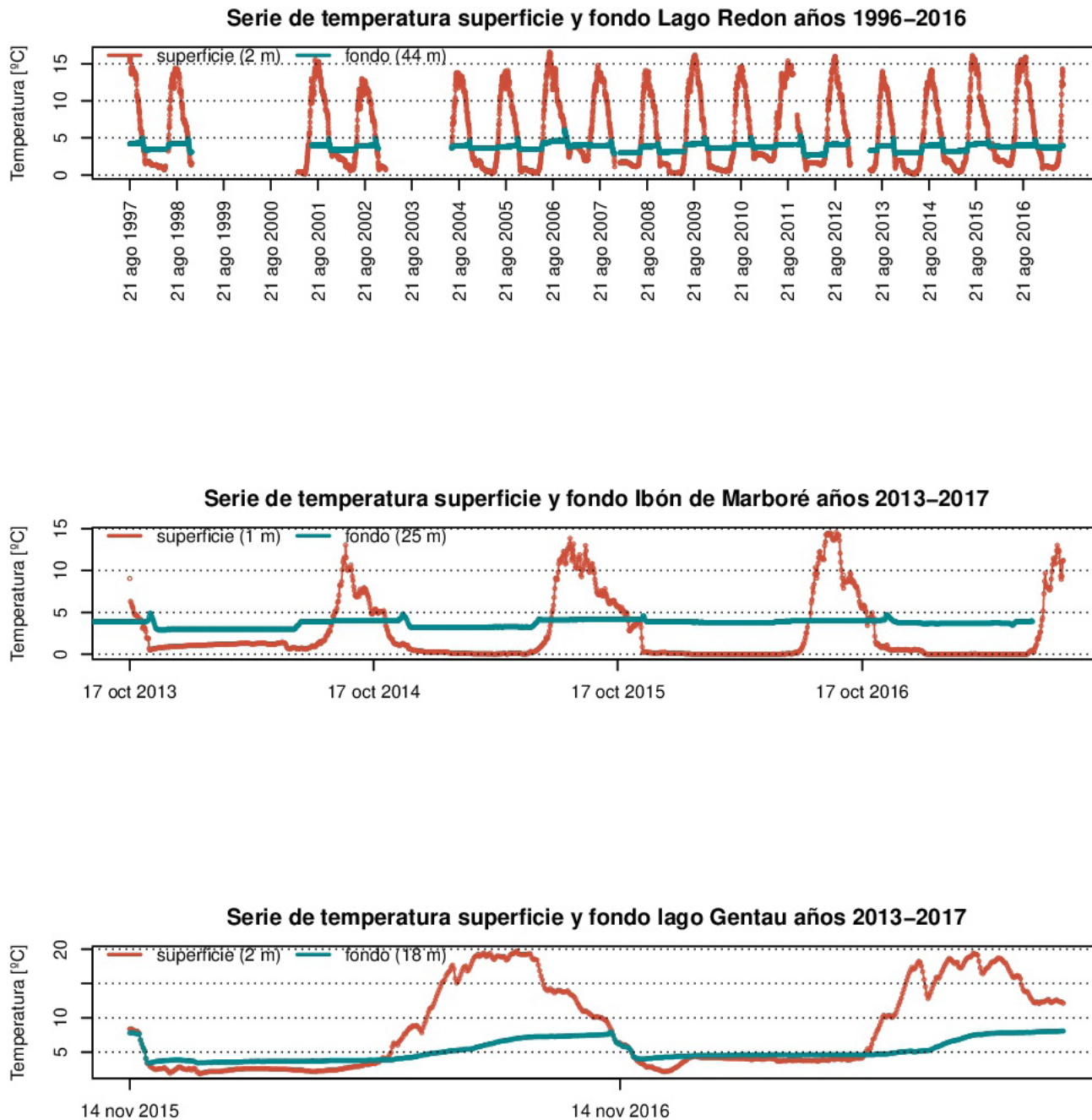


Figura 2.5.2. Perfil de temperatura y de fondo en el Lago Redon (1969-2016), Marboré (2013-2017) y Lago Gentau (2013-2017). Fuente: a partir de datos del proyecto CLAM-IGME y REPLIM.

2.5. Ecosistemas sensibles de alta montaña: lagos y turberas

la estación sin hielo, la penetración de la luz llega hasta el fondo en más del 75 % de los lagos, lo que permite el desarrollo de biota autótrofa. La radiación ultravioleta puede ser muy elevada en estos sistemas, aunque sus efectos en los microorganismos apuntan tendencias diversas. Los lagos y turberas actúan como acumuladores de contaminantes orgánicos e inorgánicos en sus sedimentos (metales pesados) (Catalan *et al.*, 1993; Camarero, 2003; Le Roux *et al.*, 2016). Más del 75 % de los lagos estudiados muestran factores de enriquecimiento para metales por encima del 1.5 (Camarero, 2003), demostrando el efecto de la contaminación atmosférica en la alta montaña, mayor en los Pirineos centrales y orientales que en los occidentales (Figura 2.5.3A).

Los sedimentos acumulados en numerosos lagos de los Pirineos muestran que la deposición atmosférica de metales pesados ha sido importante en la época romana, medieval y contemporánea asociada a la actividad minera y metalúrgica y ha decrecido desde finales del siglo XX con la reducción de las gasolinas con Pb (Camarero *et al.*, 1998). Por el contrario, otros contaminantes orgánicos han aumentado su deposición en las últimas décadas (Arellano *et al.*, 2015). Además, los lagos pirenaicos han sufrido una acidificación moderada debida a la lluvia ácida producida durante la segunda mitad del siglo XX (Camarero, 2017). Los ciclos físicos anuales en los lagos y turberas de altura muestran una gran variabilidad

estacional, dependiendo de la disponibilidad hídrica, régimen térmico estacional y periodos de presencia y ausencia de su cubierta de hielo (Figura 2.5.2 A, ciclo en Port Bielh y Figura 2.5.2B, turbera de Bernadouze). Los ciclos biológicos siguen el mismo patrón estacional, con distintas fases de máxima productividad de las comunidades del fitoplancton (Camarero *et al.*, 1999; Felip y Catalan, 2000; Ventura *et al.*, 2000). Sólo en algunos lagos se dispone de series de mediciones limnológicas plurianuales (Redon, desde 1996; Figura 2.5.2C; Marboré desde 2013; Sánchez *et al.*, 2017). Las turberas son ecosistemas esenciales en la hidrología y el ciclo del carbono en zonas de montaña (Parish *et al.*, 2008). En ellas se almacena carbono a través de la acumulación de materia orgánica y actúan como filtros (contaminantes, materia orgánica, partículas de suelo) que aseguran la calidad del agua en las cabeceras de las cuencas hidrológicas. A pesar de su relativa reducida extensión, aparecen en numerosas cuencas y mantienen una biodiversidad única. Además, las turberas de *Sphagnum* del Pirineo están en el límite meridional de su distribución geográfica y son, por lo tanto, particularmente sensibles a los cambios climáticos y antrópicos. El ciclo del carbono en las turberas de alta montaña es complejo y no está cuantificado. Las turberas son los ecosistemas terrestres más efectivos como almacenes de carbono. Las turberas de zonas templadas contienen siete veces más carbono por hectárea que cualquier otro ecosistema. Las turberas han acumulado carbono a lo largo de

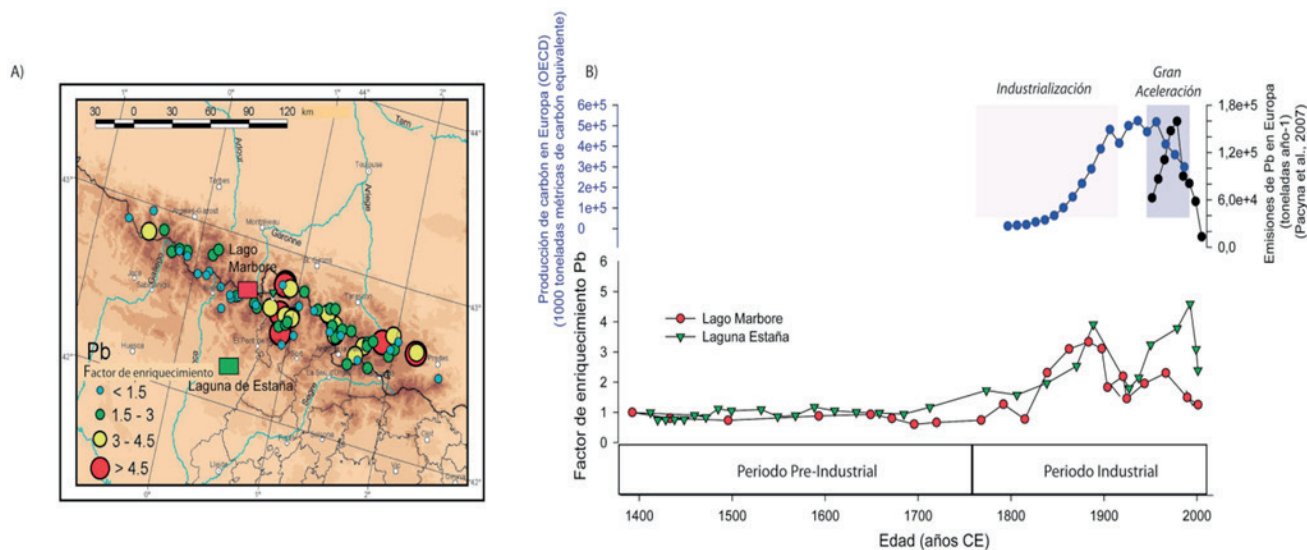


Figura 2.5.3. A. Distribución geográfica del factor de enriquecimiento de Pb en sedimentos superficiales de lagos del Pirineo. B. Factores de enriquecimiento de metales pesados en el ibón de Marboré y el lago de Estaña durante los últimos 600 años. Fuente: Camarero, 2003.

milenios, pero se desconoce la tasa de acumulación natural a lo largo del Holoceno (últimos 11700 años), del Antropoceno (últimos 8000 años) y las posibles variaciones en el siglo XX debidas al calentamiento global. A escalas temporales menores y controladas por procesos ambientales (inundaciones, sequías, fuegos, etc), las turberas pueden potencialmente actuar como emisores de CH₄ y CO₂ a la atmósfera o a las cuencas hidrológicas (como carbono orgánico disuelto o particulado). Finalmente, los microambientes de estos ecosistemas contienen una elevada biodiversidad. Para conocer la resiliencia de estos ecosistemas a los cambios climáticos y a las presiones antrópicas locales (deforestación, fuegos para aumentar los pastos, etc) es necesario identificar y cuantificar los procesos a escala anual y estacional.

2.5.3. Impactos previstos

Las zonas de mayor altitud de todas las montañas del mundo son áreas donde la incidencia del cambio climático es especialmente elevada. Los principales impactos previstos en los lagos y turberas de alta montaña y sus cuencas de recepción están relacionados con la alteración de sus características físico-químicas y biológicas como respuesta a la variación de la disponibilidad hídrica y al aumento de las temperaturas. A estas elevaciones es importante no sólo el calentamiento directo del agua de los lagos, sino también la duración de la cubierta de hielo del lago y el manto nival en su cuenca. Entre otros procesos, son esperables cambios en el ciclo de hielo y deshielo, en el tipo y abundancia de determinadas comunidades y en la composición química de las aguas (alcalinidad). En las cuencas de recepción, la degradación de los neveros y la desaparición de las áreas con suelos congelados estacionalmente (permafrost) llevará muy probablemente a cambios en la hidrología superficial y a la pérdida de comunidades vegetales relictas (ver capítulos 2.6 y 2.3). Asociadas a lagos y turberas, se encuentran las comunidades vegetales de humedales y neveros, así como muchas especies boreoalpinas en el límite de su distribución, que por ello resultan especialmente vulnerables a cualquier cambio térmico o del patrón de precipitaciones. Algunos de los servicios ecosistémicos (calidad y cantidad de agua; turismo) también podrían verse afectados.

Se han detectado cambios en el estatus trófico de lagos de alta montaña en la mayoría de montañas del mundo (Elser *et al.*, 2009; Camarero y Catalan, 2012) y las causas se han atribuido tanto a cambios en el régimen térmico y de vientos causados por el cambio climático como a cambios en la deposición atmosférica de nitrógeno y fósforo relacionados con los cambios en la circulación sinóptica de las masas de aire. El previsible aumento en la radiación UV en

zonas de montaña podría tener un efecto importante en las comunidades planctónicas de los lagos como se ha demostrado en estudios en el Himalaya y los Alpes (Sommaruga *et al.*, 1999). Estudios en los Alpes austríacos han demostrado que el efecto combinado de estos factores hace que los lagos en la franja de altitud entre 1500 y 2000 m sean ultrasensibles a los cambios de temperatura y precipitación, ya que es en este rango de altitud donde los cambios en la cubierta de hielo y el manto nival son más pronunciados. En general, los lagos más profundos tienen una mayor inercia térmica y les cuesta más calentarse y enfriarse que a los someros. Como consecuencia, es esperable que los lagos profundos respondan más lentamente a los cambios físicos (gradientes de temperatura y densidad), químicos (salinidad, alcalinidad, pH, nutrientes) y biológicos (productividad primaria, composición de las comunidades biológicas) que los someros.

Los impactos previstos en los lagos y turberas del Pirineo debidos a la variabilidad climática se superponen a los causados por las actividades antrópicas. Desde un punto de vista histórico, los lagos de los Pirineos, a pesar de su localización remota, han sufrido importantes impactos antrópicos en los últimos milenios. La deposición de metales pesados se remonta a la época romana. Los situados a menor altura, han visto sus cuencas de recepción deforestadas desde la época medieval y sometidas a mayor presión ganadera (González-Sampérez *et al.*, 2016). La introducción de algunas especies de peces ha sido una práctica habitual desde hace siglos (primeras referencias en el siglo XV, Miró y Ventura, 2013). Durante el siglo XX los impactos principales han sido la construcción de presas hidroeléctricas y el aumento del turismo y las infraestructuras relacionadas con los deportes de invierno y verano.

Los impactos del CC en estos ecosistemas pirenaicos están asociados principalmente a los cambios en los regímenes de temperaturas. La tendencia general hacia un aumento de la temperatura media en los Pirineos (unos 2oC desde el final de la Pequeña Edad del Hielo y con una tasa de 0.2oC/década desde 1950) y la disminución del periodo con cubierta de hielo supone un cambio esencial en el régimen térmico estacional de los lagos. La mayor parte de los estudios indican que el calentamiento térmico ha causado una menor acumulación y una menor duración del manto de nieve en la mayor parte de las montañas del mundo, siendo muy probable que este efecto se acelere de forma muy marcada en el futuro. Algunos modelos (Schneider *et al.*, 2010) predicen que la temperatura del agua superficial de los lagos (epilimnion) podría aumentar en más de 10oC durante el siglo XXI, respecto a las temperaturas registradas hasta la fecha?observaciones

disponibles. Estas proyecciones de cambio en el régimen hidrológico, cubierta de hielo y temperatura del agua exceden las variaciones experimentadas en estos lagos durante los últimos 11700 años (Holoceno). En varios lagos pirenaicos estudiados durante los últimos siglos (Arreo, Basa de la Mora, Marboré, Montcortès, Redon) se han documentado cambios importantes en el flujo de sedimentos, en la flora (asociaciones de algas diatomeas) y fauna (micro y macroinvertebrados) al final de la Pequeña Edad del Hielo (finales del siglo XIX) y en las últimas décadas. Las causas de estos cambios son complejas y pueden incluir factores climáticos (aumento de temperatura) y antrópicos (mayor deposición atmosférica de nutrientes). El lago Redon es uno de los mejor estudiados y muestra una tendencia clara al aumento de la temperatura (acelerada en las últimas décadas) a lo largo del siglo XX (Catalan et al., 2002; III informe CCC, 2016). Estos cambios de temperatura, particularmente mayores en el verano y el otoño, han favorecido el desarrollo de algunas especies de diatomeas planctónicas de floración otoñal (*Fragilaria*

nanana y *Cyclotella pseudostelligera*) y también de algunos crisófitos que forman los quistes en primavera. La duración de la cubierta de hielo controla también directamente el tipo de comunidades de crustáceos planctónicos (Catalan et al., 2009). La falta de series temporales largas que registren la dinámica en el pasado reciente de estos ecosistemas dificulta asignar los cambios observados en los últimos años a fluctuaciones climáticas, impacto antrópico o las esperables sinergias entre ambos factores. Existen otros efectos indirectos del cambio climático derivados de la fusión de los glaciares y de los suelos permanentemente helados (permafrost), en particular, la liberación de metales traza o contaminantes orgánicos persistentes y el aumento de la movilización de la materia orgánica y contaminantes asociados (Bacardit y Camarero, 2010). Además de la contaminación heredada y del continuado impacto de algunos metales traza, los efectos del cambio climático pueden amplificar tanto su removilización en los reservorios de estos ecosistemas como aumentar sus tasas de deposición (Le Roux et al., 2016).



Figura 2.5.4. Impactos previsibles en lagos y turberas de montaña debidos al cambio climático y a las actividades humanas.

En las turberas los principales impactos esperables del CC son: la degradación de las turberas, pérdida de superficie inundada, la inversión del efecto sumidero de carbono, y pérdida de servicios eco-sistémicos. Estos cambios podrían alterar la capacidad de estos ecosistemas para actuar como almacenes de carbono, reguladores de la cantidad y calidad de las aguas y salvaguardar la biodiversidad. El aumento de la variabilidad en las precipitaciones en alta montaña podría incrementar la frecuencia e intensidad de las sequías e inundaciones, con posibles cambios en las áreas inundadas de las turberas (ver capítulo 2.6). El aumento de la temperatura también podría prolongar el periodo productivo al aumentar la duración de la estación de crecimiento. También la tasa de descomposición de la turba podría aumentar con el incremento de las temperaturas, incrementando como consecuencia las emisiones de CH₄ y CO₂. La fusión del permafrost también podría provocar un incremento de las emisiones de CH₄ y produciendo un descenso de la concentración de carbono orgánico disuelto en los ríos. Los cambios en la hidrología también podría afectar tanto a la acumulación como a la descomposición de la turba y como consecuencia a la emisión de gases de efecto invernadero, ya que las superficies secas emiten menos CH₄, y más N₂O y CO₂, al contrario que las inundadas. El ascenso altitudinal del límite del bosque como consecuencia del aumento de las temperaturas podría llevar a una expansión del bosque en las zonas de turberas abiertas, resultando en una reducción del albedo y un refuerzo positivo en el calentamiento global.

Un aumento en la torrencialidad podría incidir en un aumento de la tasa de erosión de las turberas, que además podría verse amplificado por el drenaje de las mismas y el efecto del sobrepastoreo. Periodos de sequías más intensos podrían conllevar un aumento en la frecuencia de los incendios y en su intensidad (ver capítulo 2.4), aunque muy probablemente las actividades humanas sigan siendo la principal causa de los incendios también en futuro.

Los efectos combinados de los cambios climáticos con los cambios locales en la hidrología tendrán consecuencias importantes para la distribución y la ecología de las plantas y animales que habitan las turberas o las utilizan. Las actividades humanas aumentan la vulnerabilidad de las turberas al cambio climático. En particular, el drenaje, quema o sobrepastoreo amplificará las emisiones de carbono

2.5.4. Principales desafíos

Los principales desafíos para entender y evaluar los efectos del cambio climático en los lagos y turberas de alta montaña de los Pirineos están relacionados con la complejidad de los procesos bióticos y abióticos en estos ecosistemas, las incertidumbres de los modelos empleados, la falta de series temporales largas que registren la variabilidad natural de estos ecosistemas y nuestra capacidad para poner en práctica medidas de gestión. Uno de los principales retos es identificar y evaluar los impactos asociados al cambio climático y la creciente presión antrópica en estos ecosistemas. Por otra parte, hay que reducir las incertidumbres sobre los mayores riesgos, posibles efectos negativos y futuras presiones sobre los ecosistemas de alta montaña de los Pirineos. La falta de información detallada de las características de estos ecosistemas (desde inventarios detallados hasta cuantificación de los procesos biogeoquímicos) impide conocer la resiliencia de estos sistemas de montaña frente a las presiones del cambio climático y antrópico. Finalmente, estos ecosistemas han de incluirse en la gestión integral del territorio para garantizar su conservación y el uso sostenible de los recursos de montaña.

2.5.5. Conclusiones y recomendaciones

A pesar de la lejanía de los principales focos de actividades humanas, el impacto del cambio climático en los sistemas lacustres y turberas de alta montaña es difícil de distinguir de los efectos de las actividades antrópicas (turismo, deposición de nutrientes, uso de recursos hídricos, etc...). Aunque el impacto humano pueda ser determinante en algunos casos, el aumento de la temperatura puede poner a estos sistemas de alta montaña en una situación de mayor riesgo, al someter a las comunidades biológicas a mayor nivel de stress. Desde el punto de vista de la biota, la plasticidad fenotípica de las comunidades lacustres y de las turberas les puede permitir adaptarse mejor a las fluctuaciones climáticas y ambientales. Es importante analizar los posibles impactos desde un punto de vista holístico que incluya tanto los factores climáticos como los antrópicos, a escala global (deposición de nutrientes, contaminación) como local (efectos del turismo específico de cada zona). La adaptación y mitigación de los efectos del cambio climático en los sistemas lacustres y turberas de alta montaña precisa entender los efectos asociados al Cambio Global para poder reducirlos en la medida de lo posible.

Los lagos y turberas del Pirineo son elementos singulares reconocidos y valorados por la ciudadanía y que pueden servir para incentivar su participación tanto en su seguimiento y conservación como en la comprensión de los impactos del Cambio Global en áreas de montaña.

Entre las medidas generales para una gestión sostenible de los lagos y turberas y su adaptación a los posibles efectos negativos del cambio global destacamos las siguientes:

Medidas soft³³

- Desarrollar grupos de trabajo multidisciplinares, transfronterizos y estables a largo plazo, integrados por los representantes de todos los grupos de interés (ayuntamientos, empresas de turismo, empresas hidroeléctricas, autoridades regionales, científicos, asociaciones ecologistas, ONGs, etc) que orienten el debate sobre los efectos del cambio climático – y antrópico- en estos ecosistemas vulnerables a través de modelos participativos de observación.
- Establecer y mantener redes de observación y monitorización detallada de estos ecosistemas y promover en su seno proyectos integrados con la participación de todos los agentes del territorio.
- Incluir en los planes de ordenación de los espacios naturales los riesgos asociados al cambio climático.

Medidas verdes³⁴

- Potenciar un turismo ecológico con el mínimo impacto en espacios protegidos y la máxima integración de la ciudadanía en su conservación.
- Desarrollar programas educativos a nivel local, regional y transfronterizo para explicar los servicios ecosistémicos y su capacidad de actuar como sumidero de carbono, su capacidad natural de retención de agua, así como sus funciones de protección de la biodiversidad de montaña y la protección frente a los fenómenos erosivos.

Medidas grises³⁵

- Ofrecer incentivos para la adecuación de las empresas de turismo de montaña a los objetivos de conservación sostenible y manejo de estos ecosistemas.

IDEAS CLAVE

- Los lagos y turberas son ecosistemas icónicos del Pirineo, pero muy vulnerables. Su conservación ofrece una oportunidad para la concienciación ciudadana sobre los retos del cambio climático y la creciente presión antrópica.
- Para gestionar los efectos del cambio climático en los lagos y turberas de alta montaña del Pirineo necesitamos estrategias de monitorización que nos permitan conocer mejor los complejos procesos que se desarrollan en estos ecosistemas y disminuir las incertidumbres de los modelos y así poder mejorar nuestra capacidad para llevar adelante políticas consensuadas de gestión sostenible.

(33) Las medidas Soft o medidas no estructurales para reducir o paliar los efectos negativos del cambio climático. Esta categoría de medida está típicamente representada por los estudios de investigación enfocados a cubrir lagunas de conocimiento o para enriquecer las bases de conocimiento sobre el cambio climático, sus impactos y los sectores más vulnerables. También entra en esta categoría el desarrollo de metodologías y sistemas específicos para reducir riesgos derivados del cambio climático (ej. Desarrollo de un early warning System transfronterizo para la gestión de las olas de calor en el Macizo).

(34) Las medidas verdes o basadas en los servicios ecosistémicos: esta tipología de medida incluye todas las medidas, buenas prácticas, estudios o iniciativas que tengan como principio el uso de los servicios ecosistémicos procurados por los distintos recursos naturales para paliar los efectos negativos del cambio climático (ej. prácticas silviculturales conservativas para incrementar la capacidad de los bosques del pirineo para reducir los riesgos hidrogeológicos).

(35) Las Medidas Grey o infraestructurales, son todas aquellas que basan su acción paliativa en la construcción o implantación de elementos infraestructurales concretos (ej. Construcción de diques en las zonas habitadas de alto riesgo de inundaciones torrenciales).

2.6 Ciclo hidrológico y recursos hídricos

Coordinadores: Santiago Beguería (EEAD-CSIC)

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

RESUMEN

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

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

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

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

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

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

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

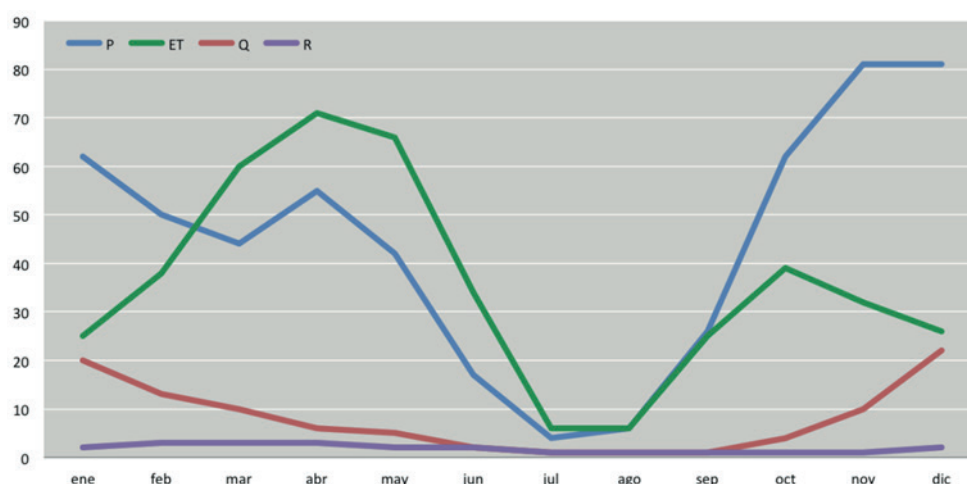


Figura 2.6.1. Balance hidrológico mensual típico de una cuenca de clima mediterráneo, con indicación de las entradas por precipitación (P), las salidas por evapotranspiración (ET), el caudal superficial (Q) y la recarga (R). Unidades: l m-2. Fuente: Beguería et al., 2015.

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

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

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

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

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

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

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

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

2.6.1 Cambios en las aguas superficiales: aportación anual

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

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

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

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

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

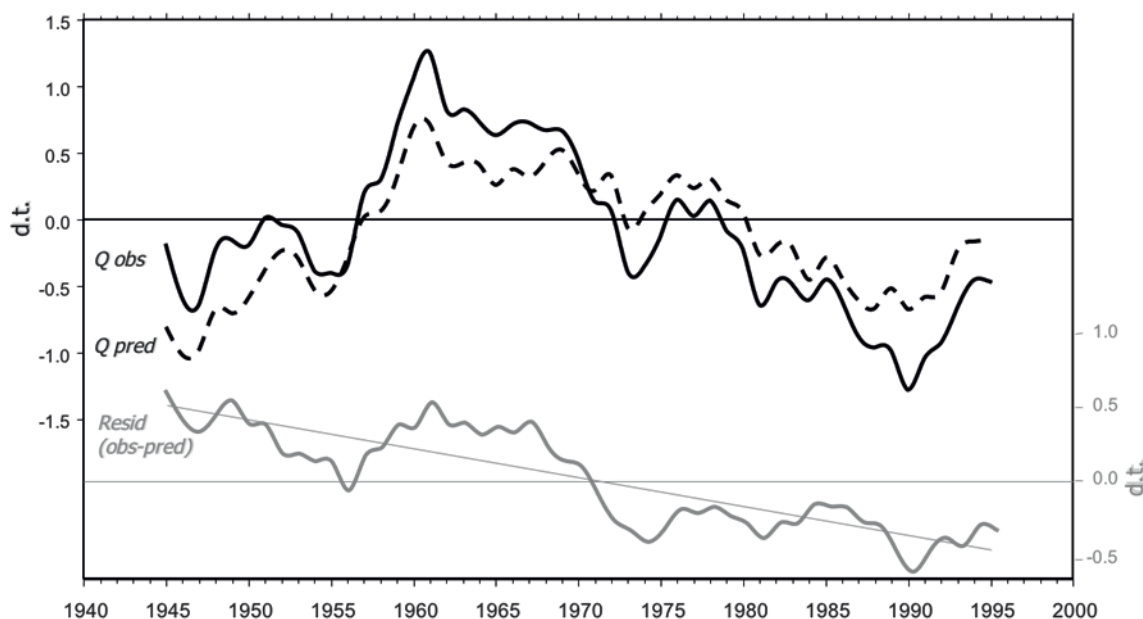


Figura 2.6.2. Evolución de las aportaciones anuales de los ríos de los Pirineos centrales españoles (Q obs) y de los caudales teóricos a partir sólo de los datos climáticos (Q pred). El residual o diferencia entre caudales predichos y observados (Resid) muestra una evolución descendente de los caudales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

2.6.2 Cambios en las aguas superficiales: régimen mensual

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

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

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

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

2.6.3 Cambios en las aguas subterráneas y en las surgencias

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

2.6 Ciclo hidrológico y recursos hídricos

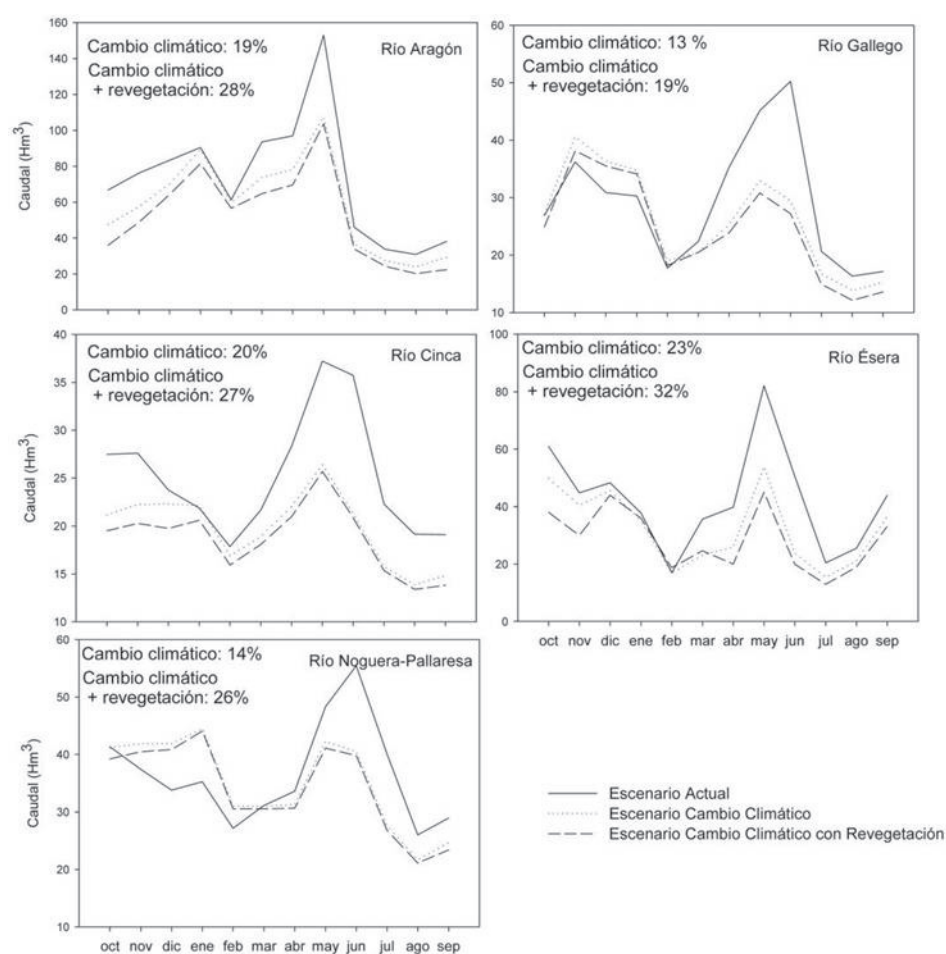


Figura 2.6.3 Variaciones en el régimen de algunos ríos de los Pirineos en el año 2050 con respecto al régimen medio del periodo 1970-2000, para escenarios de cambio climático y de cambio climático con revegetación. (Fuente: adaptado de López-Moreno et al., 2014.)

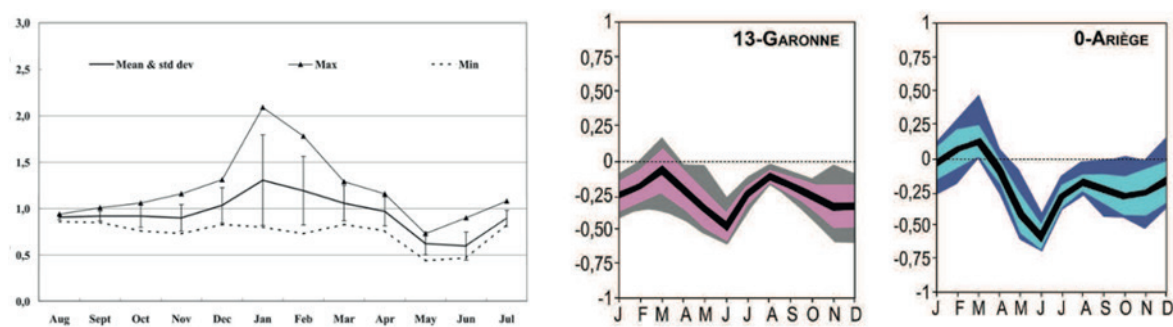


Figura 2.6.4. Variación relativa del régimen de los ríos Garonne en Foix (2055-2065 con respecto a 1985-1995); Garonne en Lamagistère y Ariège en Foix (2046-2065 con respecto a 1970-1999). (Fuente: Caballero et al., 2007; Boé et al., 2009.)

sobre el funcionamiento de los acuíferos.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.6.4 Cambios en las aguas subterráneas y en las surgencias

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

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

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

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

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

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

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

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

2.6.5 Cambios en la composición biológica de las masas de agua

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

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

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

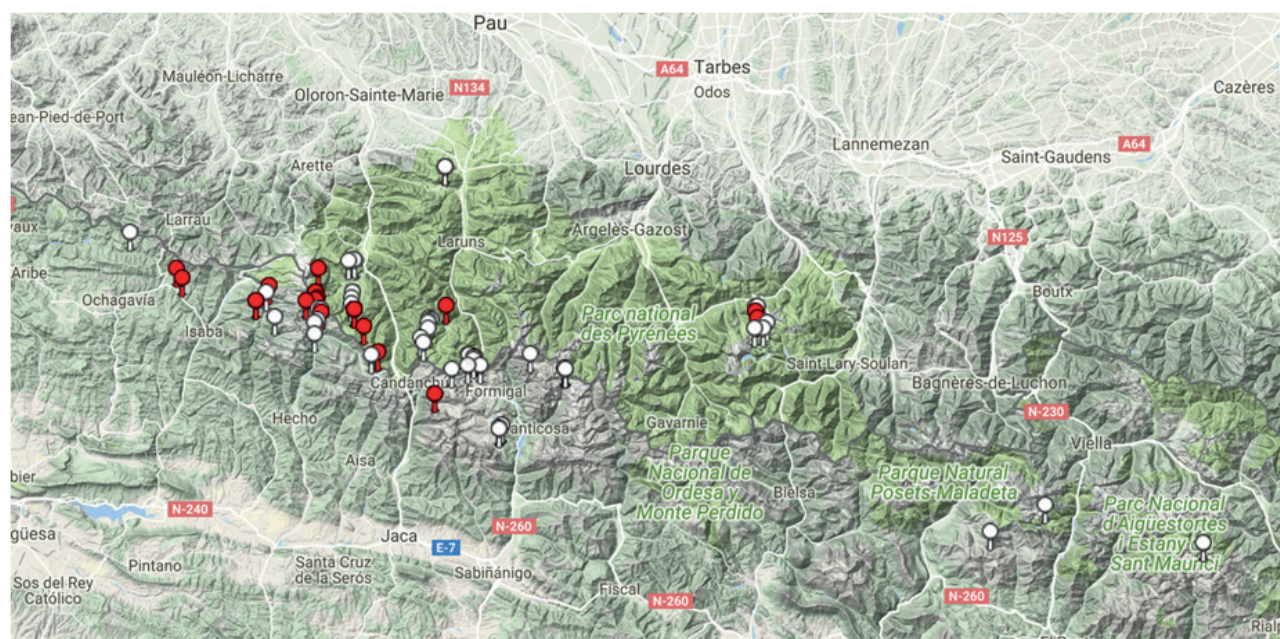


Figure 2.6.5. Prevalencia del hongo *Batrachochytrium dendrobatidis* en los Pirineos: localizaciones con presencia (marcador rojo) y ausencia (marcador blanco). (Fuente: www.bd-maps.net)

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

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

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

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

2.6.6 Conclusiones y recomendaciones para la adaptación

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

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

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

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

ENCUADRE 2.6.1 ESTRATEGIAS NACIONALES Y REGIONALES DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN RELACIÓN CON EL RECURSO AGUA

A nivel nacional, Francia y España fueron los primeros países de la UE en desarrollar sus respectivas Estrategias de Adaptación al Cambio Climático. El Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático español, de 2007, reconoce a las áreas de montaña como las zonas más vulnerables al cambio climático. Este mismo plan establece una serie de objetivos para la evaluación del impacto del cambio climático y el desarrollo de medidas de adaptación en las zonas de montaña:

- i) Integración de evaluaciones sectoriales o territoriales en el ámbito de las montañas, incluyendo la cartografía de los impactos del cambio climático;
- ii) Desarrollo de redes de seguimiento del cambio climático, incluyendo indicadores;
- iii) Seguimiento y caracterización del impacto del cambio climático sobre el balance hidrológico.

El Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático francés, de 2006, establece como objetivo principal el de presentar medidas operativas concretas para afrontar y aprovechar las nuevas condiciones climáticas, identificando algunas de ellas como el aumento de las temperaturas, olas de calor y sequías más frecuentes e intensas, etcétera. El documento identifica las acciones de adaptación territoriales como indispensables, y complementarias a las acciones encaminadas a la mitigación del cambio climático como las políticas de reducción de emisiones de efecto invernadero.

A nivel regional también existen iniciativas relevantes. Así, la Estrategia Catalana para la Adaptación al Cambio Climático de 2013 ya realiza una evaluación de los impactos observados y esperados del cambio climático en diferentes sectores socio-económicos y ambientales, identificando y promoviendo medidas concretas de adaptación. Igualmente, la Estrategia Aragonesa de Cambio Climático y Energías Limpias planifica estrategias de mitigación y de adaptación al cambio climático, en sintonía con la estrategia española. El Plan Vasco de Lucha contra el Cambio Climático plantea, para el año 2020, la consolidación de un modelo socio-económico no dependiente del carbono, y minimizar la vulnerabilidad frente al cambio climático. La Estrategia Frente al Cambio Climático de Navarra también identifica los objetivos y las acciones concretas para mejorar la adaptación de la sociedad navarra al cambio climático, estableciendo el mismo horizonte de 2020. El Plan Climático de la región Languedoc-Rousillon de 2009 propone medidas concretas de adaptación movilizándolo todas las

competencias de la región. La región de Midi-Pyrénées también desarrolló un Plan Regional para el Clima, Aire y Energía, adaptando la estrategia nacional a las peculiaridades de la región. El Plan Regional para el Clima, Aire y Energía de Aquitania de 2012 establece el marco de adaptación para esa región, e incluso llegó a formar un comité de expertos para aunar las políticas públicas con el conocimiento científico, especialmente adaptado a las condiciones de la región.

Precisamente con respecto a la gestión de los recursos hídricos, la Unión Europea ha reconocido ampliamente la necesidad de garantizar un abastecimiento suficiente en cantidad y calidad. La Directiva Marco en materia de agua (2000/60/EC) es el documento central sobre gestión de los recursos hídricos en términos de protección de los sistemas hídricos. Esta directiva se ha plasmado, por ejemplo, en los Planes de Gestión de Cuenca realizados por los distintos organismos de cuenca, de acuerdo con y desarrollando los principios de la Directiva Marco europea.

Otro documento europeo (COM/2007/414) aborda los retos derivados de la escasez de agua y las sequías en la Unión Europea, enfatizando la importancia de promover medidas de gestión eficiente de los recursos hídricos. La Directiva sobre calidad ambiental en el ámbito de la gestión hidráulica (2008/105/EC) describe los umbrales de concentración de diferentes sustancias contaminantes en los cuerpos de agua. A nivel nacional, los distintos organismos gestores del agua han adaptado el marco general de la directiva europea a sus respectivas cuencas, desarrollando los planes de gestión de los recursos hídricos para distintos escenarios futuros.

el territorio pirenaico existen diversos agentes con responsabilidad en la monitorización y gestión de los recursos hídricos (organismos gestores de cuenca y otros) y de que existen varias redes de monitorización y multitud de estudios, no existe ninguna evaluación que integre la totalidad de la cordillera. La ausencia de estudios con carácter transfronterizo es especialmente grave por cuanto la cordillera es un elemento clave en interacción con la dinámica atmosférica, por lo que cualquier estudio de futuro tiene que tener en cuenta la totalidad de la misma. Esto se pone de relieve, por ejemplo, en las discrepancias existentes entre algunas simulaciones del clima futuro realizadas en una y otra vertientes de los Pirineos, en las que se prevé una alteración de la trayectoria de las borrascas asociadas al frente polar de signo opuesto, con consecuencias también opuestas en el forzamiento del sistema hidrológico. Por tanto, existe una necesidad de abordar el estudio del ciclo hidrológico de los Pirineos en su totalidad.

3. Impacto del cambio climático en los sectores socioeconómicos

3.1 Turismo

Coordinadores: Idoia Arauzo (CTP-OPCC),
Juan Terrádez (CTP-OPCC)

Autores: Juan Terrádez (CTP-OPCC), Idoia Arauzo (CTP-OPCC).

Coautores: Marc Pons (CEMNA-IEA), David Saurí (UB), Ibai Rico (IPE-CSIC), Jeremie Fosse (eco-union).

3.1.1 Reducción del atractivo turístico invernal de las estaciones de esquí

Situación actual: el turismo de invierno es la principal fuente de ingresos y la fuerza motriz del desarrollo local en muchas zonas de los Pirineos (OMT, 2015). Sin embargo, en los últimos años este sector de la industria turística ha sido identificada como extremadamente vulnerable a los efectos del cambio climático (Pons *et al.*, 2015; EEA, 2017). El aumento significativo de las temperaturas medias, máximas y mínimas invernales registrado en ambos lados del Macizo durante el pasado siglo (OPCC, 2013) y la elevada sensibilidad de la nieve al aumento de las temperaturas, han derivado en una disminución invernal de la proporción de precipitaciones en forma de nieve y en un aumento de la energía disponible para la fusión de la nieve (Rood *et al.*, 2008). Como consecuencia, está disminuyendo el número días con una acumulación de nieve suficiente para poder desarrollar con normalidad las varias modalidades de esquí alpino, junto con una migración a cotas superiores de la línea de acumulación de la nieve (Minder, 2010; López-Moreno *et al.*, 2013). En un reciente estudio sobre la evolución de la capa de nieve y del número de días esquiables en las estaciones de esquí de los Pirineos, se ha determinado que durante el periodo comprendido entre 1960 y 2010 el número de días al año con un grosor de la capa de nieve inferior a 30 cm y 100 cm ha aumentado notablemente en todas las estaciones de esquí, acentuándose especialmente en las estaciones a baja cota (5-70% y 42-100% respectivamente) y a media cota (4-20 % y 20-65% respectivamente) (Gilaberte-Búrdalo *et al.*, 2017). También se ha ido posponiendo progresivamente la fecha de inicio de la temporada de esquí (en consideración a la disponibilidad de nieve natural), con retrasos de entre 5 y 55 días en las estaciones a baja cota y

RESUMEN

El sector turístico en la cordillera de los Pirineos se caracteriza por ser uno de los motores económicos de sus territorios. En Aragón el turismo de nieve representa el 7% del PIB y el gasto generado por los esquiadores se acerca a los 170 millones de euros por temporada (ATUDEM 2016). En el caso de Andorra se estima que el peso del turismo de nieve representa en torno a un 15% del PIB, con un impacto directo, indirecto e inducido de alrededor de 450 millones de euros por temporada (OBSA, 2014). El clima es un factor clave para el turismo de montaña. Los factores climáticos y el tiempo meteorológico son considerados como decisivos en la percepción del atractivo turístico de los distintos destinos, determinando en consecuencia las elecciones de los turistas (Eurostat, 2015). Concretamente, el efecto del cambio climático en el sector turístico respecto a la elección del destino incluye dos aspectos importantes. Por un lado puede desencadenar efectos directos en los turistas, vinculados a la modificación de la condiciones de confort térmico. Por otro lado también puede ser decisivo en la determinación de las condiciones necesarias para la práctica de ciertas actividades (ej: cobertura y espesores de nieve suficientes para la práctica del esquí), y por último puede causar alteraciones ambientales con efectos contextuales negativos. En particular, aspectos como la presencia o no de ciertas especies de fauna y flora emblemática, la calidad de los ecosistemas, el estado de las formaciones naturales iconográficas y del entorno en general también podrían verse afectados por el cambio climático (Perels *et al.*, 2015), lo cual podría desembocar en una pérdida de interés turístico. Para muchos turistas las condiciones climáticas del lugar de destino pueden determinar la programación del viaje, orientándola siempre a encontrar las condiciones idóneas para realizar las actividades previstas en el lugar de destino. En este sentido es altamente probable que la mayor variabilidad climática prevista para las próximas décadas, junto al incremento de las temperaturas medias, provoque cambios en la elección de los destinos turísticos actuales, con repercusiones tanto positivas como negativas en la dinámica de los flujos turísticos en ambas vertientes de la cordillera.

entre 5 y 30 días en las estaciones a cotas medias. Este desfase conlleva implicaciones económicas, en cuanto que generalmente supone una reducción de los ingresos anuales: el puente de la Purnúsima, las últimas semanas de diciembre e inicio de enero es un periodo de especial afluencia turística para la práctica de deportes de invierno. Puesto que el retraso del inicio de la temporada de nieve coincide con la temporada de mayor demanda turística, las estaciones de esquí se ven sistemáticamente obligadas a recurrir a la innivación artificial para permanecer operativas, con importantes repercusiones económicas por el gasto energético, además de ingentes gastos de mantenimiento asociados a los equipos de innivación artificial (Steiger y Stötter, 2013). Estudios similares tanto en otras zonas montañosas mediterráneas (Lopez-Moreno, Goyette *et al.*, 2011; Lopez-Moreno y Vicente-Serrano *et al.*, 2011; Franch *et al.*, 2016) como en los Alpes (Endler y Matzarakis, 2011; Beniston *et al.*, 2013) revelan datos similares a los obtenidos para los Pirineos.

Atendiendo a otros aspectos socioeconómicos, hay que mencionar que la demanda hídrica con fines de producción de nieve, en un contexto de disminución de la disponibilidad del agua a causa del cambio climático y los cambios de uso del suelo, podría llegar a ser un motivo de conflicto entre sectores hidro exigentes, especialmente en algunas subcuencas de los Pirineos. Este es el caso de las sub cuencas pirenaicas del Adour y del Garona, donde durante algunos años la demanda hídrica para la producción de nieve se ha equiparado prácticamente a la demanda para fines hidroeléctricos e industriales (Clarimont *et al.*, 2008). La producción de nieve artificial a gran escala, además de poner en riesgo la rentabilidad económica de las estaciones de esquí, conlleva una serie de externalidades ambientales que también han de considerarse, especialmente bajo un escenario futuro de mayor escasez de recursos hídricos (Steiger y Abegg, 2013). Por otro lado, el aumento de las temperaturas invernales también afectará la capacidad de producir nieve artificial de forma eficiente, llevando por un lado al incremento de los costes para su producción, pero también a la disminución del número de días aptos para la producción artificial de nieve (Steiger y Abegg, 2013; Pons *et al.*, 2015). Paralelamente a los afectos socioeconómicos, hay que mencionar que un aumento considerable en la producción de nieve artificial podría acarrear algunas externalidades ambientales graves a nivel medioambiental. En concreto, la producción masiva de nieve artificial podría tener efectos negativos sobre la vegetación y a su vez sobre el potencial erosivo de las laderas. Por otro lado, también podría aumentar el riesgo de alteración de la calidad del agua retornada al medio por la potencial presencia de aditivos.

Proyecciones futuras: en cuanto la situación futura, los principales modelos climáticos concuerdan en prever un agravamiento de la situación actual para mediados y finales de este siglo. Con incrementos medios de las temperaturas en los Pirineos de hasta +2°C para el 2070 y de hasta +4°C para el 2100 (Lopez-moreno *et al.*, 2008; ENSEMBLES, 2012; EURO-CORDEX, 2014), es altamente probable que tanto el espesor del manto de nieve como la superficie de cubierta de nieve sigan disminuyendo cada vez más en los próximos decenios y en consecuencia también sufran una contracción las superficies esquiables, así como del número de días de esquí por temporada. Si estas previsiones se cumplieran, además de provocar importantes alteraciones en el ciclo hidrológico y en los ecosistemas de los Pirineos, implicarían serios desafíos para el sector turístico invernal (SCAMPEI, 2012; Steger *et al.*, 2013; Kovats *et al.*, 2014; Pons *et al.*, 2014; Revuelto *et al.*, 2017).

En el contexto de un estudio de Pons *et al.*, 2015, se ha estimado la vulnerabilidad futura de las estaciones de esquí de los Pirineos en términos de impacto del cambio climático en la capacidad futura de operar de las estaciones de esquí de ambas vertientes del macizo (Figura 3.1.1).

En este estudio se evaluó la capacidad futura de operar de las principales estaciones de esquí de los Pirineos bajo dos escenarios de incremento de las temperaturas medias (+2°C, incremento previsto para el 2051-2070 de la temperatura media invernal y +4°C para el 2071-2100) y bajo la hipótesis del empleo o no de cañones de nieve artificial y tratamiento de pistas. Los escenarios propuestos hacen referencia únicamente a la variación prevista de las temperaturas, ya que es la variable que en las proyecciones climáticas más influencia tiene sobre las modelizaciones de la evolución del manto nivoso (Pons *et al.*, 2015). Según los criterios empleados en este estudio, actualmente, y durante una temporada promedio de esquí, el 93% de las estaciones de los Pirineos son capaces de operar normalmente sin el empleo de nieve artificial. Este porcentaje se elevaría hasta 98% con el empleo de cañones productores de nieve. Sin embargo, bajo un escenario de incremento de + 2°C, este porcentaje se reduciría al 44%, mientras que para incrementos de las temperaturas medias de + 4°C el porcentaje total de estaciones de esquí con plena capacidad de operar descendería dramáticamente hasta sólo el 7%. Si bien el empleo de medidas de adaptación técnicas tales como la producción de nieve artificial tendría un impacto positivo en el primer escenario considerado (de 44% a 85 %), en el escenario de + 4°C el efecto de la producción de nieve artificial sería residual y no supondría ningún incremento significativo del porcentaje de estaciones de esquí

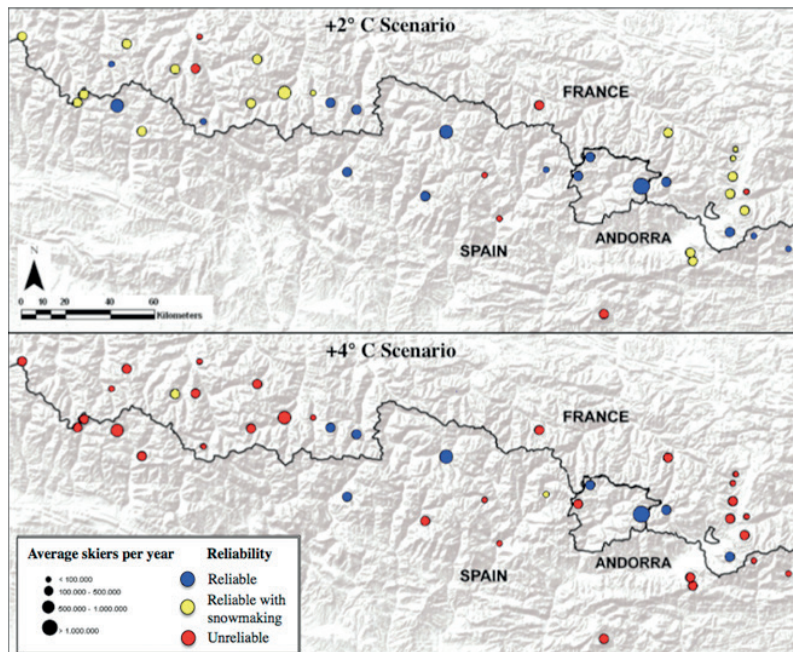


Figura 3.1.1. Evolución de la capacidad de operar de las estaciones de esquí de los Pirineos sin la producción de nieve artificial e incluyendo la producción de nieve artificial, para dos horizontes temporales y escenarios futuros diferentes (+2°C, para el 2051-2070, y +4°C para el 2071-2100). El color de los puntos hace referencia a las previsiones sobre la capacidad de operar de las estaciones según los distintos escenarios. En azul las estaciones que se prevé que mantengan la capacidad de operar, en amarillo las estaciones que podrán mantener la capacidad de operar siempre y cuando produzcan nieve artificial y en rojo las estaciones que se prevé que tengan dificultades algunos años para operar incluso produciendo nieve artificial como medida de adaptación. El tamaño de los puntos es proporcional al número de esquiadores por año que recibe cada una de las estaciones estudiadas. Fuente: Pons et al., 2015

plenamente operativas debido a la disminución de los días aptos para la producción de nieve artificial.

Aunque los estudios sobre el impacto del cambio climático en el turismo de invierno resultan poco alentadores para el sector, es importante recordar que las estaciones de los Pirineos pueden presentar diferencias sustanciales en el grado de sensibilidad y vulnerabilidad al cambio climático según las diferentes características tanto geográficas como topográficas y gestionales (Campos Rodríguez *et al.*, 2016; Navarro-Serrano y López-Moreno, 2016; Gilberte-Búrdalo *et al.*, 2017). En este sentido cabe destacar, por un lado, la elevada heterogeneidad y gran variabilidad espacial, climática, de gestión y de contexto socioeconómico y turístico llevando a grados de vulnerabilidad muy distintos a distancias muy cortas, incluso en el mismo valle. Esta diferencia de vulnerabilidad permite una posible clasificación de las estaciones pirenaicas de esquí alpino en tres grupos diferentes en función de su grado de vulnerabilidad. Un grupo de estaciones consideradas de alta vulnerabilidad, en las que ante escenarios de cambio climático medios e intensos las medidas de adaptación técnicas no bastarían para asegurar su operatividad a medio plazo. Otro grupo considerado de vulnerabilidad media en el que ante un escenario medio de cambio climático las medidas de adaptación técnicas podrían bastar, pero que en el caso de un escenario más intenso de cambio climático sería necesario implementar medidas más estructurales para asegurar su operatividad. Tales medidas tendrían que pasar por desestacionalizar las

estaciones de esquí a través de su transformación y promoción como estaciones de turismo de montaña. Por último, el grupo de las estaciones más resilientes, cuyas características geográficas y socioeconómicas les proporcionan ciertas ventajas competitivas respecto a las demás (Pons *et al.*, 2014). Esto podría desembocar, en contradicción con las conclusiones de Campos Rodríguez *et al.* (2016), a que dichas estaciones no sufran una reducción del número de esquiadores, sino que actúen como focos de atracción de los esquiadores de las estaciones más vulnerables (Pons *et al.*, 2014). Dicha hipótesis concuerda con la dinámica de ciertas estaciones de los Pirineos, en las que se han registrado mejoras o variaciones menores en sus cifras durante algunas temporadas con condiciones marginales respecto a otras temporadas con buenas condiciones de innivación (Pons *et al.*, 2014). Rutty *et al.* (2015) han estimado que en condiciones de cierre de una estación, o en situaciones marginales de nieve, solo un 5% de los esquiadores dejan o dejarían de esquiar, mientras que el resto optaría por buscar una alternativa o por esquiar con mayor intensidad cuando las condiciones son de nuevo idóneas para la práctica de esquí alpino. Por este motivo, Pons *et al.* (2014) subrayan que más que una contracción de todo el sector, lo que cabe esperar es una redistribución del mercado entre aquellas estaciones más vulnerables y las más resilientes. Por lo tanto, la buena adaptación al cambio climático debe basarse en acciones individualizadas para las diferentes estaciones en función del grado de vulnerabilidad local y de la magnitud del impacto esperado.

ENCUADRE 3.2.1. ESTIMACIÓN DE LOS COSTES DE ADAPTACIÓN DE LAS ESTACIONES DE ESQUÍ: UNA VALORACIÓN ECONÓMICA

Las valoraciones económicas relativas a la estimación de los costes de adaptación son instrumentos de gran utilidad para asistir la toma de decisiones en materia de adaptación. Aunque los valoraciones y estimas económicas en este campo han de ser interpretadas con precaución en consideración a las incertidumbre inherentes al futuro (evolución de la economía, emisiones globales y variabilidad climática futura), se trata de estudios que permiten reflejar de manera clara los hipotéticos costes y beneficios de las posibles medidas de adaptación. Tales estudios permiten optimizar las medidas de adaptación considerando el equilibrio entre coste y beneficio potenciales, así como valorar con información objetiva la factibilidad de dichas opciones (Howden *et al.*, 2007).

En un reciente estudio de Campos Rodrigues *et al.* 2016 se ha llevado a cabo un análisis de los impactos del cambio climático en zonas de turismo de invierno de España, centrándose en la descripción de medidas de adaptación potenciales. Concretamente, en esta investigación se ha llevado a cabo un análisis coste-beneficio según varios escenarios climáticos para dos medidas de adaptación: el aumento de la innivación artificial y la ampliación de horarios de actividad (horario de esquí nocturno). La tabla x recoge las estimación de las pérdida de ingresos futuros (sin medidas de adaptación) obtenidas para tres escenarios diferentes de reducción del número de días esquiabiles (Escenario bajo: -10 días, escenario medio:-20 días y escenario elevado: -30 días).

Sistema montañoso	Estación	Escenario bajo		Escenario medio		Escenario elevado	
		Forfaits diarios vendidos	Pérdida de ingresos (€)	Forfaits diarios vendidos	Pérdida de ingresos (€)	Forfaits diarios vendidos	Pérdida de ingresos (€)
PC	Baqueira Beret	731 805	-1 360 040	669 787	-2 720 081	545 753	-5 440 161
	Bof Taull	101 608	-198 952	92 536	-397 904	74 391	-795 807
	Espot Esquí	58 072	-112 701	52 933	-225 401	42 655	-450 802
	La Molina	244 188	-473 898	222 579	-947 797	179 360	-1 895 594
	Masella	340 906	-602 908	313 413	-1 205 816	258 428	-2 411 632
	Port Ainé	96 735	-187 735	88 175	-375 470	71 053	-750 940
	Port del Comte ¹	47 357	-101 818	42 714	-203 636	33 429	-407 271
	Vall de Núria	41 729	-88 846	37 677	-177 691	29 575	-355 382
	Vallter 2000	55 470	-105 780	50 647	-211 560	41 000	-423 119
PA	Astún	179 735	-394 160	161 762	-788 320	125 815	-1 576 639
	Candanchú	173 333	-365 500	156 667	-731 000	123 333	-1 462 000
	Cerler	226 073	-438 743	206 067	-877 485	166 054	-1 754 971
	Formigal	475 928	-940 279	433 051	-1 880 557	347 299	-3 761 115
	Panticosa	75 552	-149 267	68 746	-298 534	55 133	-597 069

Figura 3.1.2: estimación del número de forfaits diarios vendidos y de la pérdida de ingresos (euros) asociada a los escenarios climáticos, para las estaciones del Pirineo Catalán (PC) y del Pirineo Aragonés (PA). Fuente: Campos Rodrigues *et al.*, 2016.

En el estudio los autores concluyen que considerando los diferentes escenarios climáticos, la adopción de las dos medidas de adaptación testadas supondría en cualquier caso un incremento considerable de los costes totales, que podrían comprometer la viabilidad económica futura de algunas estaciones. Dichos costes podrían compensarse a través del incremento del número de forfait vendidos. También en este caso, el porcentaje de forfait necesarios para cubrir los costes de innivación artificial podría ser superior al 10% para varias estaciones e incluso sobrepasar el 25% según los escenarios considerados. En todo caso, el balance económico global estimado en esta investigación (resultado de la pérdida por la reducción de días de esquí, los costes de ampliación horaria y los beneficios derivados de la venta de forfait nocturnos) es negativo para todas las estaciones. Los resultados indican un balance negativo agregado comprendido entre 7 y 33,1 millones de euros. En términos generales, los autores concluyen que algunas estaciones de los Pirineos podrán tener que repensar el modelo económico y apostar por otras actividades de montaña más adaptadas a futuros escenarios climáticos. Además, a la hora de adoptar medidas de adaptación de carácter estructural o grey, es importante considerar posibles desafíos emergentes como pueden ser la necesidad de involucrar a los agentes económicos regionales en el debate, la posible necesidad de rentabilizar el capital físico invertido en las estaciones o la consideración de la tipología del mercado laboral en cada estación particular para poder analizar la capacidad de adaptación de este a la posible diversificación del sector.

3.1.2 Alteración de elementos iconográficos del paisaje Pirenaico

Situación actual: otro tipo de impacto que el cambio climático puede ejercer sobre el sector turístico de los Pirineos está vinculado a los cambios en el paisaje y especialmente a la aceleración del proceso de degradación de algunos elementos iconográficos del paisaje de alta montaña como las turberas, los glaciares y los lagos (Stewart et al., 2016). Por otro lado, los efectos del calentamiento global en la biodiversidad de la cordillera, como los cambios fisiológicos en los bosques, el desplazamiento de las comunidades vegetales hacia cotas superiores o la reducción de la biodiversidad, podrían contribuir, junto con la degradación de los elementos iconográficos anteriormente citados, a la reducción del atractivo visual de los paisajes pirenaicos. La utilización de los bosques para usos recreativos también podría verse afectada por el incremento del riesgo de incendios forestales (Barrio et al., 2007; Hystad y Keller, 2008), así como por la posibilidad de que algunos ríos y arroyos se sequen o que la calidad del agua se vea afectada por la disminución de las precipitaciones en algunas estaciones del año (Lopez-Moreno et al., 2010).

La aceleración del retroceso de los glaciares pirenaicos, además de implicar una serie de impactos indirectos a nivel ecológico (Finn et al., 2013), representa una pérdida irreversible en términos de patrimonio cultural y ambiental (Houghton et al., 2001). Desde 1984 hasta 2016, se ha estimado que han desaparecido 20 de los 39 glaciares contabilizados en 1984, lo que ha supuesto una pérdida de superficie glaciar equivalente a 516 ha. En otras palabras, en solo 32 años han desaparecido algo más de la mitad de los glaciares de los Pirineos (Lopez-Moreno et al., 2016; Rico et al., 2016). El retroceso glaciar posterior a los años 80 ha doblado el ritmo y las tasas de cambio del siglo XX, pasando de 9.33 ha de pérdida anual entre 1850 a 1984 a pérdidas de 17.76 ha anuales para el periodo comprendido entre 1984 – 2016 (Rico et al., 2017). Los estudios de balance de masa y cambios en la altimetría de superficie, confirman el desequilibrio de los glaciares pirenaicos respecto a las condiciones ambientales, con pérdidas de espesor de varios metros anuales (Chueca et al., 2007; Del Rio et al., 2014; Rico et al., 2014; Moreno-Santaengracia, 2016; René, 2017).

Si las previsiones de las principales modelos climáticos se confirmaran, es probable que a mediados del siglo XXI hayan desaparecido gran parte de los glaciares europeos, lo que supondría la desaparición casi total de los glaciares de los Pirineos dada su ubicación geográfica más meridional (DelRio et al., 2014; Radić et al., 2014; Martí et al., 2016).



Figura 3.1.3: imagen del glaciar de Monte Perdido en verano de 1981 (izquierda) y en verano de 2011 (derecha). Fuente: Lopez-Moreno et al., 2016

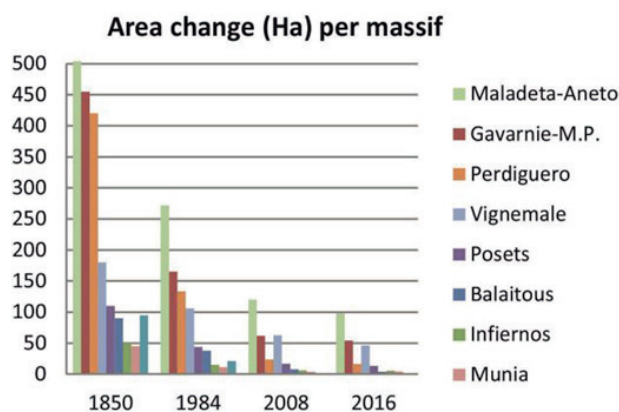


Figura 3.1.4. Evolución estimada del área de los principales macizos glaciares de los Pirineos. Fuente: Rico et al., 2017

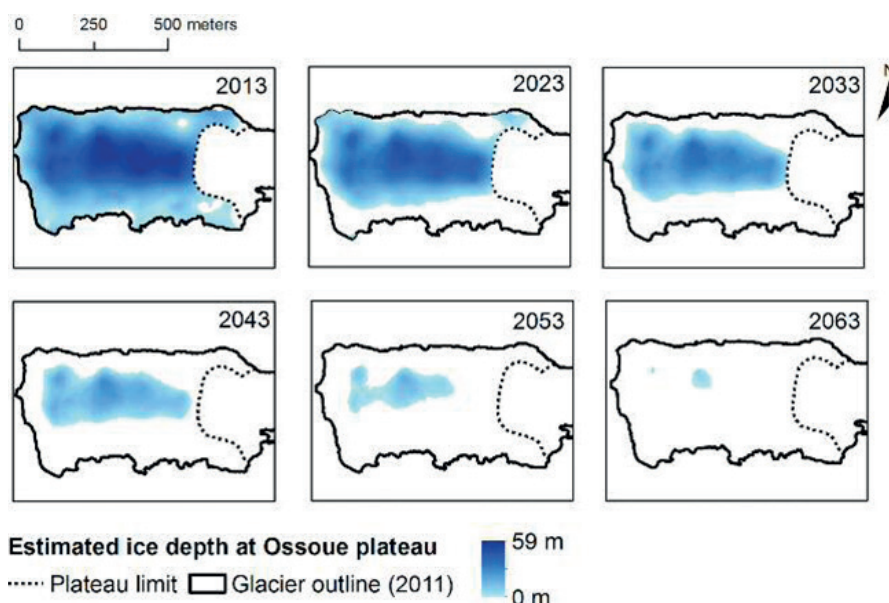


Figura 3.1.5. Estimación de la evolución de la profundidad de la masa de hielo en el plateau d'Ossoue en las próximas décadas. Fuente: Marti *et al.*, 2016

3.1.3 Incremento del riesgo de las infraestructuras turísticas a los fenómenos hidrológicos, geológicos y eventos climáticos extremos

La influencia del cambio climático sobre los riesgos hidrológicos y los riesgos derivados de los eventos climáticos extremos se configura como un elemento de inestabilidad capaz de generar ingentes daños a infraestructuras relacionadas directa e indirectamente con el sector turístico en los Pirineos (complejos hoteleros y apartamentos rurales, refugios, instalaciones de telecomunicación, carreteras de montaña y senderos turistas) y hasta en algunos casos comprometer la integridad de las poblaciones de estos lugares (Nogués- Bravo *et al.*, 2007). Las implicaciones potenciales del aumento de los riesgos hidrológicos y meteorológicos en el sector turístico incluyen tanto los daños directos a personas como daños a instalaciones de alojamiento y de infraestructura turística. Entre los fenómenos hidrológicos y geológicos potencialmente desastrosos que más pueden variar su comportamiento a causa del cambio climático se incluyen las inundaciones repentinas o avenidas provocadas por la mayor frecuencia de precipitaciones intensas y los corrimientos y deslizamientos de tierra ligados al aumento de los ciclos de hielo y deshielo provocado por la mayor variabilidad climática (Keiler *et al.*, 2010; Raia *et al.*, 2012) (más información en el capítulo 3.4.

Riesgos naturales). Otro aspecto a considerar consiste en las posibles afecciones a la seguridad de los usuarios de montaña derivados de los riesgos glaciares intensificados por el cambio climático. En particular, la degradación del permafrost puede generar un aumento de los desprendimientos de rocas (Rico *et al.*, 2017) además de cambios en montañas icónicas como Vignemale o Aneto.

3.1.4 Prolongación de la estación de turismo de montaña

El cambio climático también podría tener efectos positivos en el turismo de montaña. La extensión de la estación estival y la ocurrencia de temperaturas tendencialmente más suaves en primavera y otoño, junto con el descenso de las temperaturas mínimas, podría suponer un incremento de la elección de los destinos turísticos de montaña en detrimento de otros destinos menos confortables debido a las altas temperaturas (Isoard *et al.*, 2008). Esto podría suponer una mayor ventaja para los Pirineos en términos competitivos respecto a zonas turísticas de sol y playa, a medida que los turistas elijan cada vez más las zonas montañosas para sus vacaciones en lugar de las zonas litorales, donde las temperaturas medias y máximas más elevadas podrían reducir notablemente la idoneidad climática de las cotas bajas (Scott *et al.*, 2007).

ENCUADRE 3.1.2 LOS MODELOS DE IDONEIDAD CLIMÁTICA TURÍSTICA

Existen varios enfoques para evaluar el impacto del cambio climático en el turismo. Los modelos de idoneidad climática turística (Becker, 1998; Mieczkowski, 1985; Moreno y Amelung, 2009) incorporan varios parámetros meteorológicos como son la temperatura, la precipitación o el viento para tratar de reflejar de manera sintética y con un solo valor la idoneidad climática de los diferentes destinos según las varias actividades turísticas. Aunque estos modelos no están exentos de limitaciones (presentan una escasa validación empírica en relación al comportamiento de los turistas) y por lo tanto han de ser interpretados con precaución, se presentan como una de las herramientas más útiles para la evaluación de los efectos del cambio climático en el turismo, dado que las variables climáticas necesarias se encuentran, en general, disponibles y también porque además permiten incorporar los cambios estacionales en los factores climáticos. El índice climático turístico (ICT)³⁸ es un índice que permite estudiar la relación entre las condiciones meteo- ambientales y el bienestar físico de las personas. De este modo, permite evaluar las diferentes ubicaciones en relación al nivel de comodidad que ofrecen a los turistas, en relación a las actividades llevadas a cabo estos en cada zona del territorio y temporada del año, por lo que un ITC para el turismo estival en zonas costeras dará resultados diferentes respecto al ITC calculado para el turismo de montaña. En el ámbito del proyecto europeo PESETA, Amelung y Moreno (2009), han demostrado que efectivamente existe un buen grado de correlación entre este índice y los flujos turísticos en Europa.

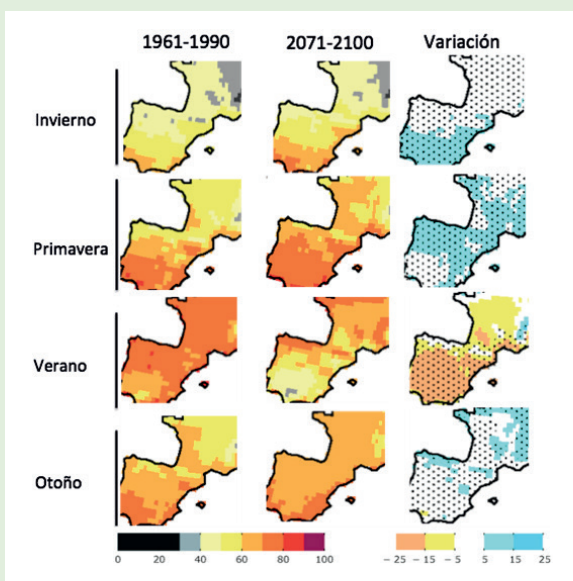


Figura 3.1.6. Valores del ICT calculados para el periodo de referencia (1961-1990, columna de la izquierda), proyecciones futuras del ICT (2071-2100, columna central), y la variación del ICT entre ambos periodos (columna de la derecha). Las condiciones climáticas futuras se basan en el SRES A2 y utilizando la media de 5 modelos de proyecciones climáticas en el contexto del proyecto europeo PRUDENCE. Fuente: Perch-Nielsen et al., 2010

Comparando la situación del ITC actual y la proyectada para el futuro (Figura 3.1.6), se observa, en líneas generales, que la idoneidad cada vez mayor a altitudes y latitudes más elevadas. A causa del cambio climático, es muy probable que a lo largo de este siglo la franja de “clima favorable” se desplace hacia el norte y hacia altitudes mayores, mejorando así la idoneidad turística de los Pirineos, especialmente en primavera y en otoño. La situación durante el periodo estival tiende a permanecer estable o con un ligero incremento de la idoneidad, pero que resulta muy significativo si comparamos la situación con las zonas costeras. Tanto en Francia como en España las previsiones apuntan a un empeoramiento del confort climático en las zonas costeras, lo que podría suponer nuevas oportunidades para la práctica del turismo de naturaleza y montaña (Perrels *et al.*, 2015).

(38) El **Índice Climático Turístico (ICT)** propuesto por el geógrafo Z. Mieczkowski está considerado como el índice de referencia para valorar el impacto del cambio climático en el turismo. Integra las variables meteorológicas que se consideran decisivas para dar plena satisfacción a una actividad turística completa.

3.1.5 Conclusiones y recomendaciones

El sector turístico de los Pirineos presenta una elevada vulnerabilidad a los impactos del cambio climático. Este sector es al mismo tiempo un importante motor económico de sus territorios. La magnitud de los impactos previstos dependerá en gran medida de las estrategias de adaptación tomadas por los distintos actores del sector (turistas, tour-operadores, autoridades de gestión del sector y los entidades locales y organismos competentes en ordenación territorial) y de la capacidad de los mismo de llevar a cabo una gestión adaptativa. En esta sección se presentan de manera sintética los principales desafíos a los que debe y deberá hacer frente el sector turístico de la cordillera, así como un marco general dedicado a las principales recomendaciones para la adaptación del sector turístico. Las conclusiones se presentan a modo de lista de los principales desafíos climáticos del sector, mientras que las recomendaciones de adaptación se presentan según tres tipologías de intervenciones o medidas de adaptación: medidas *verdes*, *grises* y *blandas*.

Principales desafíos

- Readaptar los modelos de desarrollo turístico para potenciar la resiliencia del sector frente a la disminución futura del número de días esquiables y la mayor presión ambiental de su actividad a la vez que potenciar las oportunidades emergentes para el turismo de naturaleza y montaña (concepto de estaciones de montaña);
- Reducir la vulnerabilidad de las infraestructuras turísticas al posible incremento de eventos hidrológicos, geológicos y climáticos extremos, y asegurar la integridad física de los turistas;
- Reforzar las estrategias y planes de gestión del medio natural para reducir la vulnerabilidad de los ecosistemas y de la biodiversidad de los Pirineos, con especial atención a los ecosistemas sensibles de alta montaña (ibones, glaciares, turberas etc.);
- Asegurar una gestión equilibrada de los recursos hídricos en el sector turístico, con especial atención a las cuencas alimentadas por agua de lluvia;
- Asegurar la integridad física de las personas frente

a los riesgos hidrometeorológicos y climáticos que puedan verse agravados por el cambio climático (avenidas, olas de calor, empeoramiento de la calidad del aire, del agua y degradación del permafrost);

Recomendaciones

Esta sección recopila un conjunto de medidas generales destinadas a establecer las bases para el desarrollo de mecanismos que aumenten la resiliencia del sector turístico frente al clima futuro y su variabilidad. En todo caso no existe una combinación de medidas preestablecidas eficaz para todos los destinos turísticos de los Pirineos, sino que cada realidad local deberá realizar un estudio detallado de su vulnerabilidad particular y establecer sus prioridades antes de formular e implementar un conjunto de medidas óptimas en términos de eficacia y eficiencia (coste/beneficios) para adaptarse al cambio climático.

Medidas *soft*³⁹

- Descentralizar y diversificar la oferta turística potenciando el turismo de montaña y de naturaleza, para asegurar la sostenibilidad económica del sector en consideración a la evolución del clima (potenciar la desestacionalización del turismo de montaña). Es importante involucrar en el proceso a todos los actores locales;
- Predisponer planes y normas de gestión específicas para preservar o restablecer la características naturales de las zonas turísticas y asegurar su buen estado de conservación incluso bajo las condiciones climáticas futuras;
- Emplear los pronósticos estacionales a corto plazo para la planificación de actividades de marketing a corto plazo (UNWTO et al., 2008);
- Asegurar la disponibilidad de datos sobre demanda y consumo turístico de recursos naturales para asegurar la sostenibilidad ambiental del sector;
- Promover estudios sobre las repercusiones de los impactos físicos del cambio climático en el sector turístico de los Pirineos (ej. desarrollo y seguimiento de indicadores socioeconómicos de impacto,

(39) Las **medidas Soft** o medidas no estructurales para reducir o paliar los efectos negativos del cambio climático. Esta categoría de medida está típicamente representada por los estudios de investigación enfocados a cubrir lagunas de conocimiento o para enriquecer las bases de conocimiento sobre el cambio climático, sus impactos y los sectores más vulnerables. También entra en esta categoría el desarrollo de metodologías y sistemas específicos para reducir riesgos derivados del cambio climático (ej. Desarrollo de un early warning System transfronterizo para la gestión de las olas de calor en el Macizo).

estudios de percepción del riesgo por parte de los agentes socioeconómicos locales implicados);

- Readaptar las fechas del inicio y final de la temporada de esquí;
- Introducir medidas técnicas y de gestión que puedan suponer un incremento del atractivo turístico de las estaciones de esquí (ej. esquí nocturno);
- Promover sistemas de gestión integrada de los recursos turísticos dentro macizo para ayudar a crear las condiciones que potencien estancias de los turistas menos fugaces, que se extiendan por todo el territorio pirenaico y durante todo el año;
- Promover un desarrollo local con infraestructuras de esquí y urbanismo que no pongan en peligro la calidad ambiental ni el patrimonio paisajístico.

Medidas verdes⁴⁰

- Asegurar el buen estado de conservación de los corredores naturales y su adaptación a las condiciones climáticas futuras para potenciar la interconectividad progresiva de los espacios naturales de lo Pirineos, asegurando así el buen estado de salud de los ecosistemas de montaña;
- Intensificar, cuando sea posible, la cubierta forestal en las inmediaciones de las pistas, con el fin de aumentar la duración de la capa de nieve a través del aumento de las áreas de pista sombreadas;
- Incentivar medidas de adaptación verdes para potenciar el mantenimiento natural del manto nivoso (ej. potenciar el buen estado del manto de hierba en las pendientes, diversificar especies etc.).

Medidas grises⁴¹

- Potenciar la producción de nieve artificial y medidas de mantenimiento de la misma (construcción de barreras de acúmulo y de protección contra el viento) en aquellas estaciones y laderas donde sea factible a medio plazo desde el

punto de vista climático, viable económicamente y sostenible desde un punto de vista ambiental (ej. buena disponibilidad hídrico). Es importante concentrar esfuerzos e inversiones en esta línea solo en las estaciones y zonas potencialmente propicias; Desarrollar en las infraestructuras turísticas proyectadas o en remodelación, proyecto de específicos para una gestión eficiente de los recursos hídricos y de producción energética autosuficiente y ofrece rutas turísticas para explotar el potencial del eco-turismo responsable y sensibilizar a los turistas sobre estas cuestiones;

- Implementar obras de puesta en seguridad de rutas y senderos turísticos de montaña limítrofes ubicadas en proximidad de zonas a riesgo de inundación y desprendimiento.

IDEAS CLAVE

- El cambio climático está disminuyendo el número días con una acumulación de nieve suficiente para poder desarrollar con normalidad las varias modalidades de esquí alpino, además de una migración a cotas superiores de la línea de acumulación de la nieve.
- La reducción de la capa de nieve prevista durante este siglo afectará de manera heterogénea a las diferentes estaciones de esquí de los Pirineos, en función de su localización, altitud y características de gestión.
- La intensificación de riesgos naturales provocada por el calentamiento global podría incidir especialmente en algunos destinos e infraestructuras turísticas de alta montaña
- El cambio climático podría alterar algunos elementos iconográficos del paisaje de los Pirineos, incidiendo negativamente en su atractivo e interés turístico.
- La extensión de la estación estival y las temperaturas tendencialmente más suaves en primavera y otoño, junto con el descenso de las temperaturas mínimas, podría suponer un incremento de la elección de destinos pirenaicos en detrimento de otros destinos menos confortables debido a las altas temperaturas.

(40) Las medidas **verdes o basadas en los servicios ecosistémicos**: esta tipología de medida incluye todas las medidas, buenas prácticas, estudios o iniciativas que tengan como principio el uso de los servicios ecosistémicos procurados por los distintos recursos naturales para paliar los efectos negativos del cambio climático (ej. prácticas silviculturales conservativas para incrementar la capacidad de los bosques de los Pirineos para reducir los riesgos hidrogeológicos).

(41) Las **medidas Grey o infraestructurales**, son todas aquellas que basan su acción paliativa en la construcción o implantación de elementos infraestructurales concretos (ej. Construcción de diques en las zonas habitadas de alto riesgo de inundaciones torrenciales).

3.2 Agropastoralismo de montaña

Coordinadores: Juan Terrádez (CTP-OPCC), Idoia Arauzo (CTP-OPCC)

Autores: Juan Terrádez (CTP-OPCC), Idoia Arauzo (CTP-OPCC).

Coautores: Rosa M. Canals (UNAV, Dpto. Producción Agraria. Grupo Ecología y Medio Ambiente) María Durán (UNAV, Dpto. Producción Agraria. Grupo Ecología y Medio Ambiente), Jordi Puig (Espigall).

3.2.1. Impactos y vulnerabilidades en el sector agrícola

La disminución del periodo de heladas y el incremento de las temperaturas medias podría favorecer la expansión de cultivos no habituales en los Pirineos, como los cultivos de ámbito mediterráneo o los de origen subtropical. En cambio, otros cultivos principalmente de secano podrían ver restringida su área de distribución potencial a causa de una mayor variabilidad en el régimen de las precipitaciones y al incremento de la temperatura. En consecuencia, los períodos entre finales de primavera y principios de otoño tendrían unas evapotranspiraciones mucho más elevadas.

A. Desplazamiento de las áreas de idoneidad de los cultivos

La modificación de las condiciones climáticas muy probablemente causará el desplazamiento de las áreas potencialmente idóneas para el adecuado crecimiento de algunos cultivos (Mereu *et al.*, 2008). Si bien para algunas especies cultivadas el área de distribución potencial⁴² podría verse reducida, como en el caso del maíz cultivado en secano (Iglesias y Rosenzweig, 2009; Donatelli *et al.*, 2012), otros cultivos como la vid o el olivo podrían verse beneficiados (Ponti *et al.*, 2014). Gracias al incremento de las temperaturas medias y al descenso del número de días con heladas, los cultivos especialmente sensibles al frío pero resistentes a la baja disponibilidad hídrica como la vid y el olivo podrían expandir su área de distribución potencial hacia terrenos a mayor latitud y altitud (Arblaster,

RESUMEN

La agricultura y la ganadería son sectores socioeconómicos clave por su elevado valor estratégico, económico y territorial en ambas vertientes de los Pirineos. Aunque su presencia es desigual en la cordillera, según los datos disponibles la agricultura emplea al 8,4% de la población activa en la vertiente francesa, y representa un potencial económico de más de 500 millones de euros €, basado principalmente en la producción agropecuaria (ACAP, 2017). En cambio este sector ocupa a un 0,4% de la población activa en Andorra y representa un total de 12,8 millones de euros del producto interior bruto del país (IEA, 2016). En las próximas décadas, el cambio climático podría influir de manera significativa en la capacidad de producción de las superficies agrícolas pirenaicas, tanto por los efectos directos del aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera (en positivo) como por el cambio en las condiciones climáticas y medioambientales (básicamente, en negativo). Los principales impactos del calentamiento global sobre el agroecosistema se asocian a disminuciones en la producción debido a un mayor estrés hídrico y térmico en los cultivos, la pérdida de tierras agrícolas debido al incremento de los riesgos hidrológicos, y a un incremento del riesgo de propagación de plagas. Por otro lado, las nuevas condiciones agro-climáticas podrían propiciar la expansión de algunos cultivos, de raíz mediterránea, no habituales en los Pirineos.

Los pastos de montaña son un recurso fundamental para el sector y además generan numerosos servicios ecosistémicos a la sociedad (de producción, de mantenimiento de la biodiversidad, de paisaje, de recursos hídricos de calidad y sumideros de carbono (Bernues *et al.*, 2014).

El incremento de la concentración de CO₂ atmosférico, el consecuente incremento de la temperatura media del aire, así como los cambios en el régimen estacional de las precipitaciones y la mayor frecuencia e intensidad de los eventos climáticos extremos, afectarán a la agricultura y a la ganadería extensiva ligada al aprovechamiento de los pastos de montaña en los Pirineos, provocando impactos de diferente magnitud e incluso de diferente signo según las zonas consideradas.

(42) La **distribución potencial** de una especie es un término que se emplea en los modelos predictivos, y que hace referencia a los lugares donde potencialmente puede estar presente una determinada especie, porque se dan las condiciones climáticas y ambientales necesarias para su correcto desarrollo.

2007; Donatelli *et al.*, 2012; Tanasijevic *et al.*, 2014), donde hasta ahora las condiciones climáticas no lo habían permitido.

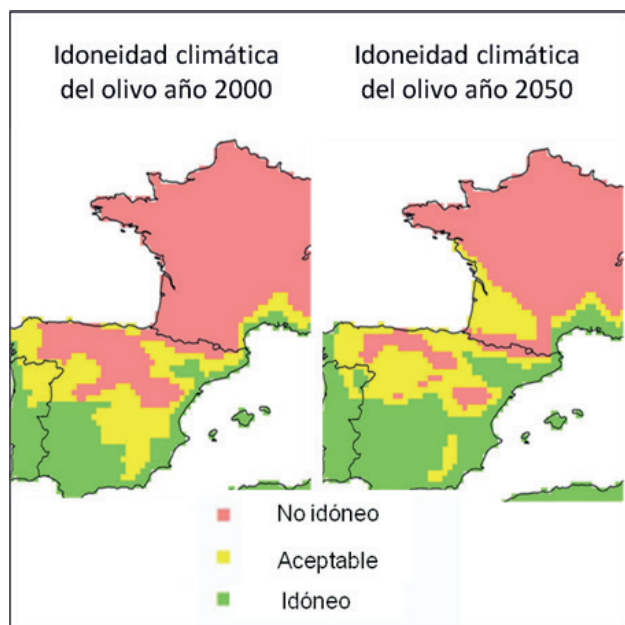


Figura 3.2.1. Estimación de la evolución de la idoneidad climática para el cultivo del olivo en el periodo 2000- 2050, empleando el modelo ECHAM5 y el escenario emisor A1B. Fuente: Tanasijevic *et al.*, 2014

Por lo que respecta a los Pirineos y en particular para el cultivo del olivo, se estima una expansión de la superficie potencialmente idónea y aceptable (Moriondo *et al.*, 2008; Tanasijevic *et al.*, 2014). Sin embargo, no hay que olvidar que los eventos extremos cada vez más frecuentes como las heladas tardías, podrían revertir parte de los efectos positivos anteriormente citados, ya que incidirían sobre las plantas en un estado de desarrollo avanzado y más vulnerable a las heladas (Trnka *et al.*, 2015). Por esta razón los nuevos cultivos de cariz mediterránea se tendrían que situar en zonas muy favorables y utilizando variedades de ciclo corto y tardío.

B. Cambios en los rendimientos de los cultivos

El cambio climático tiene efectos positivos y negativos en el rendimiento de los cultivos. Los

impactos positivos más significativos son el efecto fertilizante del CO₂ atmosférico y el ensanchamiento de la temporada de crecimiento. Los impactos negativos (observados y esperados) más relevantes son los cambios en la fenología de los cultivos, mayores déficits hídricos y un incremento del riesgo de daños por eventos climáticos extremos.

La capacidad productiva de los cultivos agrícolas y los pastos está fuertemente condicionada por dos factores: la temperatura atmosférica y la cantidad de agua disponible en el suelo. El cambio climático influye directamente en ambas variables, pudiendo generar efectos negativos en la cantidad y calidad de la producción final. Además de los cambios progresivos producidos por el incremento paulatino de las temperaturas y la mayor variabilidad de las precipitaciones, los eventos climáticos extremos (olas de calor, sequías prolongadas y precipitaciones intensas) pueden generar impactos puntuales pero muy significativos en los cultivos. A nivel europeo, el cambio climático ha sido considerado como uno de los principales factores asociados al estancamiento del rendimientos de algunos cultivos clave como los cereales, a pesar de los continuos progresos agronómicos (Brisson *et al.*, 2010; Olesen *et al.*, 2011; EEA, 2016).

Entre los impactos observados, cabe mencionar los cambios agrofenológicos⁴³ en los cultivos. El incremento progresivo de las temperaturas medias está provocando el adelanto de buena parte del calendario agrícola y, en particular, ha provocado el avance de la fecha de la floración y cosecha de muchos cultivos (figura 3.2.2). Si bien los cambios fenológicos pueden ser parcialmente contrarrestados a corto plazo a través de la implementación de prácticas de gestión agronómica (ej. adelanto de la fecha de siembra o elección de variedades tardías), puede que estas medidas no sean suficientes para asegurar los niveles de producción actuales de muchos cultivos a medio y largo plazo (Trnka *et al.*, 2014)

Según un reciente estudio del Centro Común de Investigación de la Comisión Europea (JRC), en el área correspondiente al macizo pirenaico la floración del trigo se ha anticipado un promedio de 0,35 ± 0,15 días por año entre 1985 y 2014, con diferencias significativas según la zona específica considerada. Análogamente a la floración, también la fecha de maduración o de llenado del grano y por lo tanto el momento de la

(43) Los **cambios agrofenológicos** hacen referencia a los cambios en el ciclo anual de los cultivos en relación a los factores climáticos.

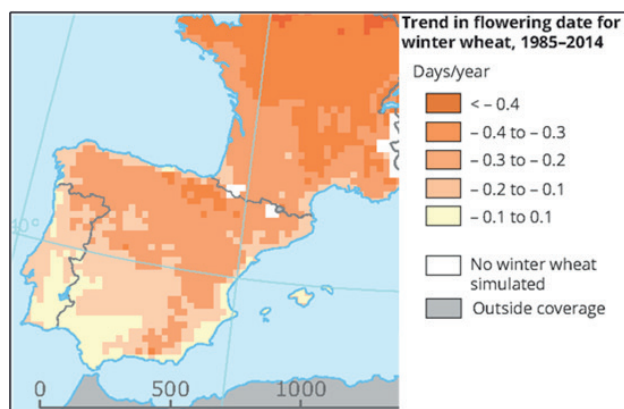


Figura 3.2.2. Estimación de la tasa de cambio de la fecha de floración del trigo de invierno durante el período 1985-2014, expresada en número de días de adelanto por año. Fuente: EEA, 2016 de MARS/STAT database.

recolección se ha anticipado considerablemente en el último trenteno, lo que supone una aceleración considerable del ciclo vegetativo del cultivo. En general, un ciclo vegetativo acelerado implica un uso menos eficiente de la energía térmica, de la radiación solar y de los recursos hídricos disponibles y, en consecuencia, un menor rendimiento final del cultivo.

En el caso del sector vitícola, el avance de la floración y recolección podría desembocar en disminuciones significativas de la producción en algunas áreas (Ponti *et al.*, 2015). Fraga *et al.* (2016) han valorado que la fecha de floración y recolección de la uva en las zonas correspondientes al pre pirineo de ambas vertientes, podría adelantarse 30 ± 10 días y 40 ± 10 días respectivamente en el 2040-2070 respecto al período 1980-2005. Uno de los efectos negativos observados durante las últimas décadas se debe a la coincidencia de estados de maduración temprana con la mayor frecuencia de eventos climáticos extremos durante los meses de verano. En estas circunstancias la uva puede resultar dañada, ya que el fruto absorbe y/o pierde mucha agua en poco tiempo. Este efecto de sobre hidratación y desecación continuado por exceso puntual de agua y calor, a menudo desencadena la rotura de la piel del fruto, provocando la podredumbre de la uva madura antes de su cosecha (Lareboullet *et al.*, 2013). Aunque a rangos moderados de aumento de las temperaturas la productividad de la vid podría aumentar, también podría verse alterada la calidad de la cosecha y las propiedades del producto final (mayor grado alcohólico del vino o desequilibrio entre el grado alcohólico y fenólico). Es probable que a medida que se intensifiquen los efectos del cambio climático, el

sector deba modificar progresivamente sus técnicas de producción e incluso cambiar las variedades cultivadas por otras más adaptadas a las nuevas condiciones agroclimáticas, planteando potenciales problemas para la producción con denominación de origen ligada a lugares y variedades específicas de los Pirineos. Un aspecto fundamental para el correcto crecimiento de los cultivos es la relación entre disponibilidad y demanda de agua. La demanda de agua de los cultivos se define como el agua necesaria durante la temporada de crecimiento para que los cultivos se desarrollen correctamente. Ésta varía significativamente entre los distintos tipos de cultivo y según el momento de la estación de crecimiento. La variabilidad creciente en el régimen de las precipitaciones y la mayor frecuencia e intensidad de las sequías, están provocando desequilibrios entre la creciente demanda hídrica de los cultivos y la cada vez menor disponibilidad de agua en el suelo, generando lo que se define en términos agronómicos como déficit hídrico de los cultivos (Felten *et al.*, 2011).

Respecto al impacto de los eventos climáticos extremos, estos pueden causar daños significativos en los cultivos y generar pérdidas considerables en la producción. A causa de las olas de calor estivales de los años 2003 y 2010, se estima que las pérdidas en las cosechas de cereales alcanzaron el 20% de la total en las regiones europeas afectadas. En muchos casos, los periodos más calurosos coinciden además con periodos de sequía, provocando un efecto sinérgico negativo. Durante la estación de cultivo 2004/2005 se estimó que la producción de cereales en la Península Ibérica cayó, en promedio, alrededor del 40% respecto a la media de otros años (IPCC, 2014).

Finalmente, como impactos previstos, si bien no existen proyecciones específicas para el Macizo sobre la evolución de la agrofenoología, es muy probable que el periodo vegetativo de muchos cultivos se vaya acelerando paulatinamente con el incremento de las temperatura (Savé *et al.*, 2012; Ponti *et al.*, 2015), afectando negativamente a su rendimiento y a la calidad final de los frutos y grano (Olesen *et al.*, 2012; Ferrise *et al.*, 2013; Funes *et al.*, 2015; Fraga *et al.*, 2016).

Respecto a la evolución proyectada del déficit hídrico de los cultivos, el cambio esperado en el régimen estacional de las precipitaciones, la mayor frecuencia e intensidad de la sequías y olas de calor, además del aumento de las tasas de evapotranspiración potencial (García- Ruiz, 2011), muy probablemente generen una mayor variabilidad interanual en la disponibilidad de recursos hídricos, desembocando en una mayor frecuencia de situaciones de déficit hídrico en algunas zonas y cultivos de la cordillera pirenaica (Figura 3.2.3).

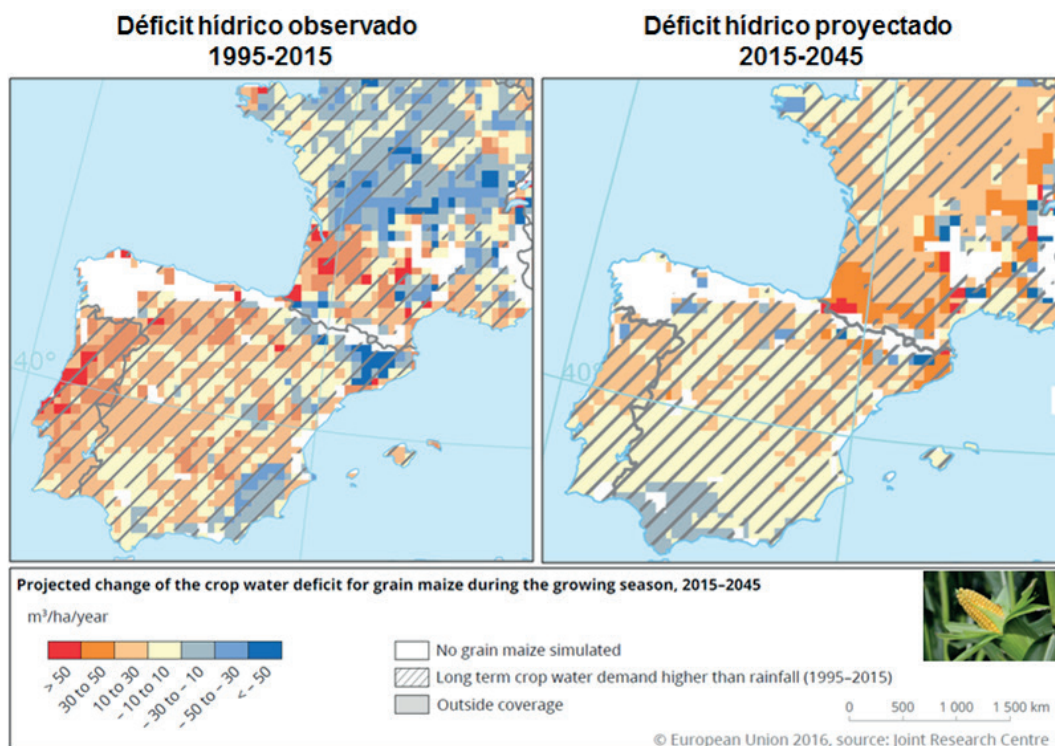


Figura 3.2.3. Estimación del déficit hídrico observado (izquierda) y proyectado (derecha) para el cultivo del maíz según el modelo climático de circulación global MIRIOC. Las simulaciones se realizaron utilizando el modelo agroclimático WOFOST para el escenario de emisiones RCM8.5. El color rojo indica un aumento en el déficit hídrico y el color azul indica una reducción del déficit. Las áreas donde la demanda de agua de los cultivos excede regularmente la disponibilidad de agua están marcadas con rayas transversales. Fuente: JRC, 2016.

El creciente déficit hídrico podría incidir directamente en la productividad y calidad de los cultivos de secano, e indirectamente en los cultivos de regadío por un incremento de las necesidades de riego (Ciscar *et al.*, 2013). Este desequilibrio entre disponibilidad y demanda hídrica en ciertos períodos del año, podría aumentar el riesgo de potenciales conflictos entre sectores (sector agrícola y doméstico/industrial y servicios). Según los modelos empleado por el JRC, el déficit hídrico para el cultivo de maíz podría ser especialmente elevado en el extremo oriental norte y occidental sur del Macizo. No obstante, es previsible que el valor de dicho incremento varíe notablemente según cultivos, regiones y vertiente de la cordillera, por lo que serán necesarios estudios más detallados y con mayor resolución para poder diseñar e implementar las

medidas de adaptación más oportunas en cada caso. Por último, el posible aumento de los riesgos naturales inducidos o intensificados por el cambio climático (derrumbes, deslizamientos de tierra, avenidas, etc.) podrá afectar negativamente a las tierras agrícolas ubicadas en zonas de media montaña, a través de la intensificación de los fenómenos erosivos y de la pérdida de suelo agrícola. Además, la mayor incidencia y extensión de los incendios forestales proyectadas para las próximas décadas (Giannakopoulos *et al.*, 2009), podrían aumentar temporalmente la superficie de suelo desprovisto de cubierta vegetal, incrementando la exposición de las capas superficiales a la erosión hídrica. Por otro lado, una atmósfera más caliente podría suponer una aceleración del proceso de mineralización de la materia orgánica del suelo⁴⁴. Esto

(44) La mineralización se puede definir como el proceso de conversión de la materia orgánica del suelo (MOS) en materia inorgánica. Un suelo rico en materia orgánica cuenta con una mejor estructura y entre otras ventajas es más resistente a los procesos erosivos. Un suelo empobrecido en materia orgánica es generalmente más vulnerable a los procesos erosivos.

podría tener efectos tanto positivos como negativos. Por un lado, una mayor mineralización implicaría una mayor disponibilidad de nutrientes para el crecimiento vegetal (como nitrógeno y fósforo) pero a su vez también supondría la pérdida de carbono fijado en estructuras más o menos estables del suelo. Esta reducción del carbono orgánico en los suelos implica una disminución de sus funciones como sumidero de carbono (fijar carbono atmosférico en el suelo) e incidiría además en su estructura empeorando los agregados organo-minerales encargados de dar una mayor fertilidad al suelo. Como consecuencia de este debilitamiento de la estructura de los agregados, los suelos podrían volverse más vulnerables a los procesos de erosión física y ser menos capaces de almacenar agua disponible para los cultivos. En este sentido, las lluvias torrenciales más frecuentes podrían intensificar los fenómenos de pérdida de suelo, sobre todo en los suelos arables con escasa vegetación y pobres en materia orgánica, ya de por sí vulnerables a la erosión hídrica (Olesen *et al.*, 2007; Jones *et al.*, 2012; Panagos *et al.*, 2015).

La estación de crecimiento térmico es un indicador agroecológico que refleja en qué lugares y en qué momento se pueden cultivar potencialmente los distintos cultivos, asumiendo que cuenten con suelos adecuados, dispongan de suficiente agua y radiación solar. La extensión de la estación de crecimiento refleja la duración del período durante el cual la temperatura está por encima de un cierto umbral, a partir del cual los cultivos pueden crecer correctamente. La duración de la estación libre de heladas se considera el período más favorable para el crecimiento de la mayor parte de plantas y cultivos, y de su calendario dependen los momentos clave en el ciclo vital de los distintos cultivos como la floración o el período de llenado del fruto. En las últimas décadas se ha ampliado el período comprendido entre las últimas heladas de primavera y las primeras heladas otoñales, traduciéndose en una disminución de los días sin heladas en toda Europa (Brázdil *et al.*, 2011). Por lo que respecta a los Pirineos,

se ha estimado que el número de días con heladas ha disminuido alrededor de $0,4 \pm 0,2$ días por década durante el periodo comprendido entre 1985 y 2014 (ESPON project, 2013; EEA, 2016). En las zonas de cultivo de los Pirineos, donde las bajas temperaturas y las oscilaciones térmicas son el mayor factor limitante, el incremento de las temperaturas mínimas durante la estación invernal e inicio de la primavera podría suponer un incremento de la producción de los cultivos más sensibles al frío, aunque las heladas tardías puntuales, junto al adelanto de la fecha de inicio de los ciclos vegetativos podrían generar pérdidas importantes en algunos cultivos (Maracchi *et al.*, 2005). Por lo que respecta al efecto fertilizante del incremento de la concentración de CO_2 atmosférico, ha sido probado experimentalmente que un incremento de la concentración de dióxido de carbono estimula el crecimiento y la producción de los cultivos y permite un uso más eficiente del agua debido a la disminución de la conductancia estomática⁴⁵. Independientemente de la tipología de planta (C3 o C4), el incremento de las concentraciones de CO_2 induce el cierre parcial de los estomas, reduciéndose así el consumo de agua por transpiración, sin ninguna implicación negativa en el proceso de fotosíntesis (Bernacchi *et al.*, 2007; Arellano *et al.*, 2012; Kruijt *et al.*, 2018). Cuanto mayor es la concentración de CO_2 , más alta es la tasa fotosintética, y mayor la capacidad de la planta para crecer y fijar carbono atmosférico (Ainsworth y Long, 2005). No obstante, este aumento no sería lineal, y tampoco todos los cultivos reaccionarían de la misma manera, variando su comportamiento en función del tipo de metabolismo. Así pues, los cultivos con metabolismo tipo C3⁴⁶ (como los cereales de invierno y las leguminosas grano y forrajeras), responden mejor al aumento de la concentración de CO_2 que las plantas con metabolismo tipo C4⁴⁷ (como el maíz y el sorgo) puesto que estas últimas ya cuentan con un proceso fotosintético muy eficiente, y por lo tanto responden de manera menos notable al incremento de la concentración de CO_2 atmosférico (Long *et al.*, 2006; Yano *et al.*, 2007).

(45) La conductancia estomática es un parámetro de proporcionalidad que relaciona el flujo de agua transpirada a través de los estomas con la fuerza motora del estoma.

(46) Las plantas con metabolismo **C3 realizan la fotosíntesis de manera eficiente a temperaturas moderadas** (pico de eficiencia máxima a 20 °C). Puesto que los estomas se encuentran abiertos durante las horas diurnas, una temperatura excesiva conduce a un aumento de la transpiración vegetal. Se denominan plantas C3 debido a que el primer compuesto orgánico producido por fotosíntesis es una cadena carbónica con tres átomos de carbono, el 3-fosfogliceraldehído o gliceraldehído 3-fosfato.

(47) Se definen como plantas **C4 algunas especies características de climas tropicales y subtropicales**, como por ejemplo el maíz o el sorgo, **que emplean una vía diferente y más eficiente que las plantas C3 para fijar el carbono atmosférico**, siendo más eficiente el uso del agua en la fase de fijación del carbono.

Algunos autores han estimado que, de media y en ausencia de factores de estrés biótico y abiótico para concentraciones de CO₂ atmosférico de 550 ppm, se podrían alcanzar incrementos de la productividad de los cultivos de entre 10 y 20% para las plantas C3 y de entre el 0 y 10% en plantas C4 (Gifford, 2004; Long *et al.*, 2004). Otros autores sugieren que en el caso del trigo, el efecto fertilizante del aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera podría incluso contrarrestar los efectos negativos inducidos por condiciones de mayor estrés hídrico (Manderscheid y Weigel, 2007). Sin embargo, el potencial efecto fertilizante del incremento de la concentración de CO₂ puede verse fuertemente limitado y condicionado, además de por una menor disponibilidad hídrica, por otros factores limitantes directamente relacionados con el cambio climático. Entre estos factores cabe destacar la menor disponibilidad suelo, la mayor frecuencia e intensidad de los eventos climáticos extremos, la mayor difusión de parásitos y otros organismos nocivos, así como la menor disponibilidad algunos nutrientes esenciales como el nitrógeno y el fósforo, cuya disponibilidad podría no adecuarse al ritmo necesario que demanda la mayor productividad ligada al efecto fertilizante del CO₂.

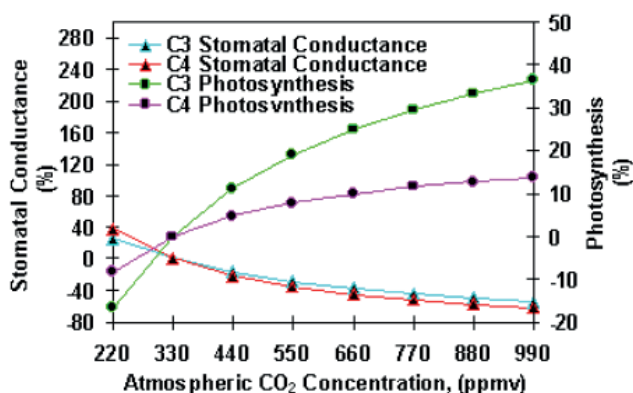


Figura 3.2.4. Curva de incremento de la eficiencia fotosintética y disminución de la conductancia estomática en las plantas con metabolismo C3 y C4, en función de la concentración de CO₂ en el aire. Fuente: AVEMAC project; JRC, 2012

Por otra lado, la asimilación de elevadas concentraciones de CO₂ ocasiona cambios en la relación carbono-nitrógeno de los distintos componentes vegetales, lo cual puede afectar negativamente a la calidad final de las cosechas (Makowski *et al.*, 2015). A la luz de los múltiples factores en juego y de la complejidad de las potenciales interacciones entre ellos, será necesario potenciar el desarrollo de estudios centrados en el diseño e implementación de modelos dinámicos de simulación para obtener una valoración más exhaustiva de los hipotéticos efectos positivos de la mayor concentración de CO₂ en los distintos cultivos de interés en los Pirineos.

C. Expansión de plagas y enfermedades agrícolas

Las interacciones entre las plantas y sus enemigos naturales están influenciadas por las condiciones ambientales y, en gran medida, por las temperaturas. La eventual modificación de las áreas de distribución de algunos cultivos y la mayor sensibilidad/susceptibilidad de los mismos por las condiciones de estrés climático pueden propiciar una variación en los patrones de distribución y difusión de las fitopatías actuales, así como un mayor riesgo de expansión de fitopatías emergentes (Bellocchi *et al.*, 2010; Luck *et al.*, 2011).

Los mecanismos principales a través de los cuales el cambio climático influye en la difusión y aparición de nuevas plagas son principalmente tres. En primer lugar, las nuevas condiciones climáticas, y el incremento de las temperaturas mínimas en particular, permiten que un mayor número de patógenos completen nuevos ciclos reproductivos a lo largo del mismo año. En particular, los insectos son individuos ectotérmicos⁴⁸, que responden rápidamente a los cambios en la temperatura ambiental. En consecuencia, la distribución, desarrollo y reproducción de las distintas especies de insectos está estrechamente relacionada con las temperaturas. En las regiones boreales y alpinas de Europa se han descrito ya fenómenos de multivoltinismo⁴⁹ en insectos relacionados con el cambio climático, que están afectando el rendimiento de cultivos y ocasionando defoliaciones severas en masas forestales (Dalín *et al.*, 2012; Stoeckli *et al.*, 2012; Klapwijk *et al.*, 2013). En el caso de los microorganismos,

(48) Los organismos ectotermos son organismo cuya temperatura es controlada, principalmente, por una fuente externa de calor y su capacidad de generar calor metabólico es insignificante. Ejemplos típicos de animales ectotérmicos son los anfibios, la mayoría de los peces y los invertebrados. Actualmente se utiliza el término termoconformador para designar a estos organismos.

(49) El fenómeno del multivoltinismo se refiere a especies que completan más de un ciclo vital en el transcurso de un año.

ENCUADRE 3.2.1 ESTUDIO SOBRE LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO DEL SECTOR AGRÍCOLA DEL ALTO PIRINEO Y ARÁN: UNA ESTIMACIÓN ECONÓMICA

El estudio “Adaptación al cambio climático del sector agrícola del Alto Pirineo y Arán: riesgos y oportunidades” analiza las implicaciones del cambio climático en la agricultura de este territorio a partir de una modelización climática de implantación de cultivos, comparando el escenario actual con un escenario futuro (2030-2050).

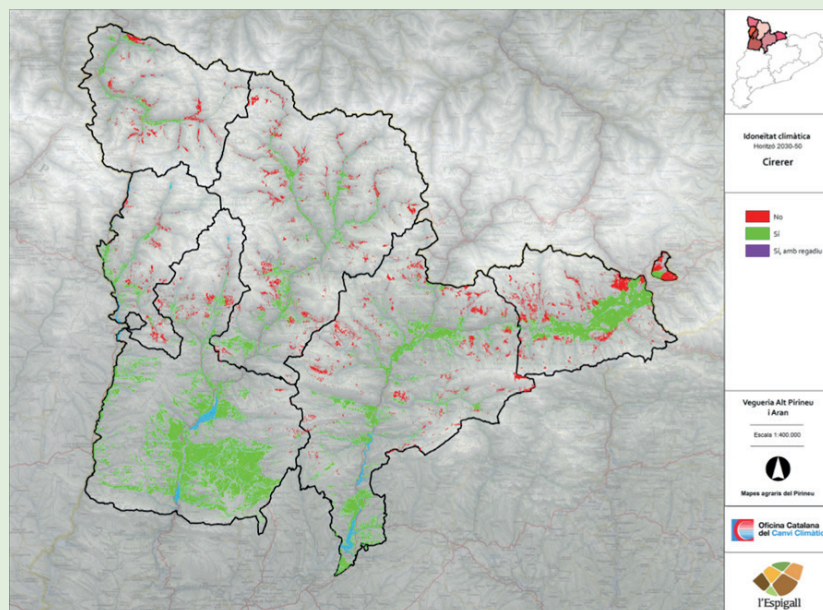


Figura 3.2.5. Mapa de idoneidad climática proyectada para el cultivo del cerezo en el Alto Pirineo y Arán para el periodo 2030-50, respecto a la idoneidad climática actual. Fuente: OCC, 2017

El estudio concluye que la climatología de estos valles pirenaicos evolucionará hacia un clima mediterráneo seco. El rigor de los inviernos será menor y los días de helada se reducirán, mientras que los veranos serán más largos, calurosos y secos. En consecuencia, los cultivos de tipología mediterránea (viña, olivo, cereales...) y los frutales de menores necesidades hídricas serán los más favorecidos, mientras que algunos cultivos tradicionales del secano pirenaico como la patata, podrían sufrir una fuerte regresión. En los regadíos, es probable que los frutales como el manzano y el peral competirán con cultivos hortícolas y forrajeros entre otros. En el estudio se estimó que los ingresos brutos del sector agrícola en esta zona de los Pirineos, actualmente 84,3 M€ al año, podrían sufrir una contracción del - 8,9% en el escenario 2030-50 (en base a la información del “Pla de Regadius de Catalunya 2008-2020”). Los autores argumentan que las estrategias para limitar tales impactos deberían centrarse en las zonas de secano, ya que su resiliencia frente a la sequía es mucho más limitada que en el caso de los cultivos de regadío. Los autores proponen un cambio de enfoque productivo que supondría el paso de la actual agricultura destinada a la alimentación animal, hacia una agricultura para la alimentación humana. Para ello, proponen como principal línea de actuación el incremento del aprovechamiento de los pastos naturales (pastos supraforestales y terrenos forestales no arbolados en los valles) para reducir la presión actual sobre los suelos agrícolas y revertir la actual tendencia de avance de los bosques en zonas de pasto y la pérdida de biodiversidad asociada. Esta expansión de los pastos naturales supondría la liberación de 26.103 ha de superficie agrícola, que podría destinarse a cultivos para la alimentación humana atendiendo a su máximo rendimiento económico y mínimo consumo de agua. En concreto, los autores proponen la integración de diez cultivos para consumo humano en las áreas liberadas, ubicándolos según criterios de idoneidad climática presente y futura (manzano, peral, cerezo, judía seca, vid, olivo, centeno, espelta, patata y alubias). Adoptando esta solución, los autores estiman que los ingresos brutos del sector agrícola en el escenario futuro podrían llegar a 181,1 M€ anuales frente a los 84,3 M€ actuales o los 76,7 M€ previstos para el mismo escenario futuro sin actuación. Este estudio ha sido publicado por la Oficina Catalana del Cambio Climático, en el marco del proyecto Life MEDACC y con la colaboración de la empresa l'Espigall.

las condiciones de cambio pueden estar favoreciendo a algunas especies en periodos del año en los que anteriormente su desarrollo se veía limitado por las bajas temperaturas. Un ejemplo sería *Colletotrichum coccodes*, un hongo que afecta gravemente al cultivo de la patata (antracnosis de la patata) y que en muchas regiones de Europa y también en el sur de Francia y norte de España está sustituyendo por importancia y magnitud de sus efectos negativos a *Rhizoctonia solani* otro hongo causante de la podredumbre de la patata (Manici y Caputo, 2009; Garibaldi y Guillino, 2010).

En segundo lugar, las nuevas condiciones climáticas podrían crear zonas climáticamente idóneas para la expansión de nuevos organismos nocivos introducidos desde zonas más cálidas, y que podrían extenderse rápidamente por falta de competencia y predadores naturales. Este es el caso de *Sclerotium rolfsii* (o *Athelia rolfsii*), hongo típico de las zonas tropicales que se introdujo en Europa hace algunos años y que en España está afectando significativamente a muchos cultivos de patata y maíz (Tanmoy *et al.*, 2016). Por último, la mayor frecuencia e intensidad de estados de estrés abiótico inducidos por los eventos climáticos extremos, podría incrementar los niveles de sensibilidad de los cultivos al ataque de algunos organismos patógenos. Este es el caso de *M. phaseolina*, un hongo que afecta a los principales cultivos hortícolas y cuyos efectos negativos en los cultivos de fresa han ido en aumento en el sur de la península en los últimas décadas (Garibaldi *et al.*, 2009; Husaini *et al.*, 2016; de los Santos *et al.*, 2016). Según un reciente estudio, el cambio climático, junto a otros factores como el comercio global y las técnicas actuales de gestión agronómica de los suelos, podrían provocar una expansión considerable de este hongo en los cultivos hortícolas, especialmente marcado en la vertiente sur del Pirineo central (figura 3.2.6)

Sin embargo, otros patógenos como el oídio de la vid podrían verse limitados por el aumento de las temperaturas (IPCC, 2014).

3.2.2. Pastos naturales de montaña: impactos y vulnerabilidades

Los pastos de montaña además de ser un recurso fundamental para el sector ganadero, son ecosistemas con una elevada biodiversidad, valor paisajístico y

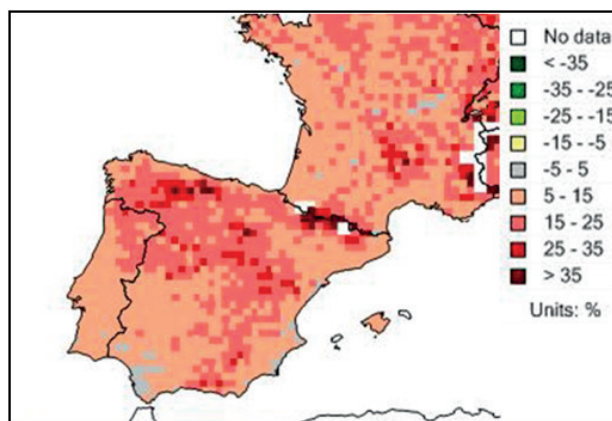


Figura 3.2.6. Estimación de la diferencia en el crecimiento relativo (en %) de *M. phaseolina* en el 2030 respecto a las condiciones climáticas del 2012. El color rojo oscuro indica máximo incremento del crecimiento relativo. Fuente: Manigi *et al.*, 2012.

cultural (Arranz, 2013; Leip *et al.*, 2015). El cambio climático y en especial el incremento medio de las temperaturas y los eventos extremos están influyendo tanto en la productividad como en la composición de los pastos naturales de montaña en los Pirineos.

A. Cambios en la producción y la calidad de los pastos

La productividad de los pastos pirenaicos está limitada en mayor medida por las bajas temperaturas que por la escasez de agua (Sebastià, 2007). Por ello es de esperar que el incremento de las temperaturas medias, junto al efecto fertilizante de la mayor concentración de CO₂ atmosférico⁵⁰ y las mayores tasas de mineralización de N orgánico edáfico⁵¹, provoquen un incremento en la productividad de los pastos de montaña (Anderson, 2008), siempre y cuando las sequías durante la primavera y el verano no sean excesivamente severas (Nettier *et al.*, 2010; Climfourrel, 2011). En términos generales se puede asumir que si se doblase la concentración de CO₂ en la atmósfera, los pastos de montaña incrementarían su productividad en un 20-30% aproximadamente, siempre y cuando el nitrógeno y fósforo a disposición

(50) Bajo condiciones de laboratorio el incremento de la concentración de CO₂ aumenta la velocidad del proceso de fotosíntesis en muchas plantas, y por lo tanto la velocidad a la que absorben CO₂ para su fijación. Este efecto se conoce como la fertilización por CO₂.

(52) El N disponible para el crecimiento vegetal es limitante en suelos de montaña, a pesar de que los contenidos edáficos de N orgánico son elevados. Unas mayores temperaturas favorecen tasas de mineralización de N mayores gracias a una mayor actividad de la fauna microbiana del suelo.

y la disponibilidad de agua no fueran limitantes (EEA, 2016). Sin embargo, es altamente probable que la mayor frecuencia e intensidad de las sequías y otros extremos climáticos como las lluvias intensas y las olas de calor previstos para las próximas décadas impacten de manera negativa sobre los pastos, pudiendo incluso contrarrestar los efectos positivos (Pico-Cochard *et al.*, 2015). Se ha demostrado que tras sequías muy intensas durante la temporada estival, es muy difícil la recuperación del rebrote otoñal (Zwicke *et al.*, 2013), de lo que se deduce que la producción otoñal de los pastos dependerá en gran medida de la intensidad y frecuencia de la sequías estivales.

No obstante, es de suponer que la magnitud e incluso el signo de tales efectos presenten una gran variabilidad tanto espacial como temporal en toda la cordillera. En este sentido, es altamente probable que predominen los efectos negativos en la productividad de los pastos durante la temporada estival en las zonas del macizo con influencia mediterránea, mientras que los efectos positivos sean más notables durante la primavera, y en las zonas de influencia atlántica (Climfourel., 2011). Paralelamente, el incremento de las temperaturas medias, los extremos climáticos y el incremento de la concentración atmosférica de CO₂ están generando cambios físicos y químicos en los pastos (Niderkorn *et al.*, 2014; Dumont *et al.*, 2015), pudiendo alterar el rendimiento y a la calidad final de la producción animal y de sus productos derivados (ej. productos cárnicos, lácteos etc.). En concreto, se ha demostrado que el incremento de las concentraciones de CO₂ atmosférico tiene efectos negativos en los contenidos de nitrógeno, y por lo tanto de proteínas, en las plantas (Niderkorn *et al.*, 2014; Dumont *et al.*, 2015). No obstante, cabe la posibilidad de que, a nivel de comunidad, la disminución de nitrógeno y de proteínas sea compensada, al menos en parte, por una mayor presencia de leguminosas en los pastos multiespecíficos ya que esta familia botánica rica en nitrógeno podría verse favorecida por las nuevas condiciones climáticas (Dumont *et al.*, 2015). Por otro lado, el agotamiento y deshidratación de la vegetación pascícola por las altas temperaturas y la falta de lluvias durante ciertos períodos del año, provoca una pérdida de palatabilidad que podría determinar una menor apetibilidad e ingesta de forraje por parte del ganado.

B. Alteraciones en la composición florística y de la diversidad

Además de afectar a la producción de los pastos, los cambios en las condiciones climático- ambientales podrían modificar la distribución actual de las distintas especies (Cantarel *et al.*, 2013), alterando la composición de las especies características de las comunidades

pascícolas de montaña y favoreciendo la aceleración del proceso de matorralización de los pastos (García *et al.*, 2015). Al proceso de matorralización (expansión de arbustos como el boj *Buxus sempervirens* en el Pirineo central) se suman los efectos del proceso de forestación natural (expansión de árboles por encima del piso supraforestal), muy evidentes en todo el Macizo y que podría tener también potenciales implicaciones a nivel del riesgo de incendios, cambios en los albedos, en la duración del manto nivoso o en las condiciones microclimáticas (para más información consultar el capítulo 2.4. Bosques).

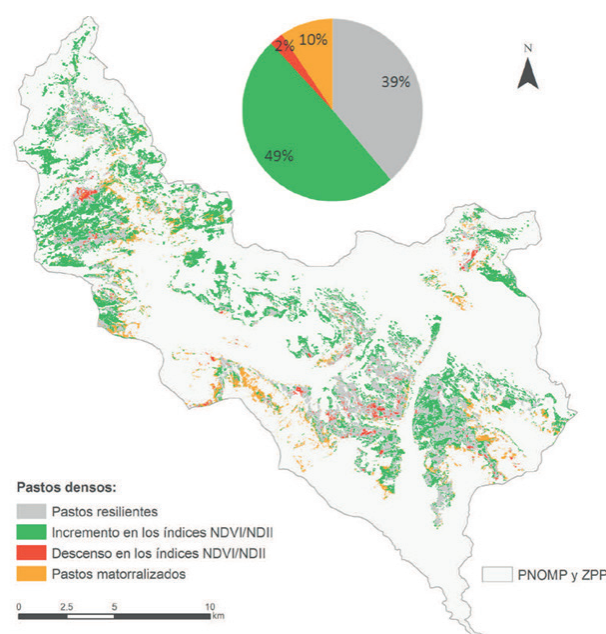


Figura 3.2.7. Estimación de la matorralización de los pastos del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido entre las décadas de 1980 y 2000. El incremento en los índices muestra un incremento en biomasa y en verdor de los pastos; el descenso de los índices detecta la degradación del pasto. Fuente: García *et al.*, 2015.

Además también se está produciendo la expansión de algunas especies herbáceas autóctonas, gramíneas perennes principalmente, muy competitivas ante las nuevas condiciones ambientales, como *Brachypodium pinnatum* en el Pirineo occidental (Canals *et al.*, 2014; 2017), que degradan los pastos a través de la pérdida de diversidad florística inducida por su expansión. La menor diversidad florística implica una menor resistencia (resiliencia) de la comunidad vegetal, y por lo tanto, una menor capacidad de adaptarse a las

nuevas condiciones climático-ambientales. El cambio climático se posiciona como un factor de estrés añadido capaz de actuar en sinergia con los cambios de uso del suelo, la actual tendencia de degradación de los agroecosistemas y el abandono progresivo de la agricultura extensiva de alta montaña (Busqué *et al.*, 2016). En este contexto, es vital la relevancia de las interacciones existentes entre el clima, los usos del suelo y la gestión de los pastos. Acciones sencillas de adaptación de la gestión de los pastos como la modificación del calendario de pastoreo o de la temporada de corte del forraje, podrían compensar al menos temporalmente, parte de los potenciales efectos negativos del cambio climático, e incluso permitir obtener beneficios de los impactos positivos a coste cero.

3.2.3. Sector ganadero extensivo: Impactos y vulnerabilidades

También la producción ganadera se ve afectada por el cambio climático tanto directa como indirectamente. El incremento de las temperaturas medias y las olas de calor influyen de manera directa en el estado de salud y bienestar de los animales. El cambio climático también puede afectar indirectamente a la producción animal a través de la menor disponibilidad de pastos de calidad y agua. Además, las nuevas condiciones climáticas podrían favorecer una mayor difusión y prevalencia de enfermedades del ganado (Heffernan *et al.*, 2012; Gauly *et al.*, 2013) incluidas las transmitidas por vectores (Estrada-Peña *et al.*, 2012).

A. Reducción del bienestar animal y de la producción ganadera

La capacidad del ganado para mantenerse en buen estado de salud depende directamente de las características climáticas del ambiente en el que viven (Lacetera *et al.*, 2013). Para cada especie hay un rango de temperaturas ambientales óptimas, definido como la zona de neutralidad térmica⁵². Cuando la temperatura ambiental supera la zona de neutralidad, los animales reaccionan activando una serie de mecanismos fisiológicos que se traducen en el aumento de la frecuencia respiratoria, de la sudoración y del consumo de agua para contrarrestar el aumento de la temperatura corporal (Fregley, 1996; Bernabucci *et al.*, 2010). Cuando son sometidos a estrés térmico, los animales reducen además el consumo de alimentos y su actividad metabólica, afectando directamente a su estado de nutrición y rendimiento reproductivo (Roy y Prakash, 2007; Mader, 2007) y en general a su salud y estado de bienestar. Si las condiciones de estrés térmico se alargan en el tiempo, aumenta incluso el riesgo de muerte (Nardone *et al.*, 2010). El THI⁵³ (*Temperature Humidity Index* en inglés) es un indicador del estrés

ENCUADRE 3.2.2. “ALPAGES SENTINELLES ALPINS”: RED DE ACTORES PARA PRESERVAR LA BIODIVERSIDAD Y SALUD DE LOS PASTOS DE ALTA MONTAÑA FRENTE A LOS DESAFÍOS DEL CALENTAMIENTO GLOBAL

A raíz de las sucesivas olas de calor y de la preocupación creciente sobre los impactos del cambio climático en los pastos de alta montaña, el Parc National des Écrins ubicado en los Alpes franceses, decidió reunir a su Comisión de Agricultura para abordar la problemática. Conscientes de la multifuncionalidad de estos ecosistemas de alto valor paisajístico, ecológico y cultural, así como del interés común de limitar los efectos negativos del cambio climático sobre los mismos, se creó un grupo de trabajo transversal en el que se implicó a los ganaderos locales, los gestores de espacios protegidos, los gestores de explotaciones ganaderas, las autoridades de los municipios interesados y a la comunidad científica.

Atendiendo a la posición privilegiada del Parc National des Écrins para el desarrollo y posterior seguimiento de iniciativas de diseño e implantación de acciones para la adaptación, los actores implicados crearon de manera colectiva la red de “Pastos centinela de montaña”. El programa, cofinanciado con fondos FEDER, tiene como finalidad mejorar la comprensión sobre la dinámica futura de los espacios agro-pastorales de alta montaña en el contexto del cambio climático y anticipar así los posibles efectos negativos. Entre las acciones específicas promovidas por la iniciativa están:

- la creación de una red de observación de la evolución climática en las diferentes parcelas de estudio
- la definición de protocolos robustos y comunes para valorar los efectos del cambio climático en los pastos de alta montaña
- la creación y dinamización de un espacio de diálogo continuo entre los actores implicados

El programa, que fue lanzado en el 2011, se ha extendido a otras áreas protegidas (Parque Nacional de Vanoise y Mercantour, Vercors, Charteruse, Lubéron y Ventoux). Hoy en día la red cuenta con una treintena de pastos centinela, que forman parte de 37 explotaciones ganaderas incluidas en 7 territorios alpinos. La iniciativa está coordinada por IRSTEA e involucra a socios científicos, gerentes de áreas protegidas, pastores y representantes del sector agrícola. En el 2018 y gracias a la cooperación entre actores y territorios, se publicará una guía metodológica para evaluar la exposición y la sensibilidad de los pastos de montaña a los riesgos climáticos, así como un conjunto de fichas técnicas para la “gestión a prueba de clima” de los agroecosistemas de alta montaña.

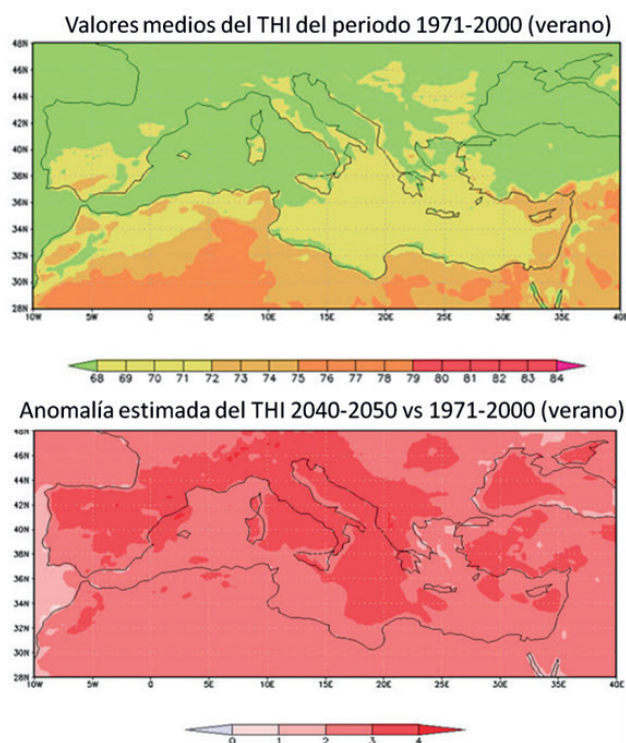


Figura 3.2.8. Valores medios del índice THI durante el periodo comprendido entre 1971-2000 (arriba) y anomalía estimada del valor de THI para la década 20140-2050. Fuente: Segnalini et al., 2012.

térmico que combina valores de temperatura y humedad ambiental. En las últimas décadas, este índice ha aumentado su valor en toda Europa, ocasionando impactos negativos en la ganadería (Vitali *et al.*, 2008).

Es altamente probable que en futuro las situaciones de estrés térmico para el ganado sean más frecuentes e intensas también en los Pirineos (Segnalini *et al.*, 2012). En ausencia de apropiadas medidas de adaptación, el cambio climático podría afectar negativamente

a la rentabilidad de las explotaciones ganaderas de la cordillera, especialmente en las explotaciones intensivas ubicadas en valles de media montaña, y durante los meses de verano (Beltrano *et al.* 2009).

B. Nuevas zoonosis y difusión de enfermedades del ganado

Por otro lado, el cambio climático también está considerado como uno de los factores implicados en la mayor aparición de zoonosis es decir, la difusión y transmisión de organismos causantes de enfermedades y de sus vectores de difusión, en sincronía con la mayor movilidad de bienes y personas (Patz y Olson, 2006). De hecho, la mayor parte de los insectos vectores de enfermedades son muy sensibles a factores climáticos como la temperatura y la humedad, afectando decisivamente a sus poblaciones. Como consecuencia, es muy probable que el previsto aumento de las temperaturas medias extienda también el área de distribución de algunos vectores de enfermedades ya presentes en el territorio del macizo donde las condiciones climáticas se han adecuado a sus ciclos biológicos, y al mismo tiempo facilite la importación, implantación y expansión de nuevos organismos patógenos (Iriso *et al.*, 2017). Además, también podría producirse una reducción de la duración del ciclo de desarrollo de los vectores autóctonos y la extensión de la estación idónea para la transmisión de los agentes patógenos. Un ejemplo evidente es el caso de la expansión hacia latitudes mayores de la incidencia de la enfermedad de la lengua azul⁵⁴ del ganado. Se trata de una enfermedad vírica transmitida por un díptero del género *Culicoides* que actúa como reservorio y transmisor del virus. Hasta hace pocas décadas Europa estaba libre de este virus.

En el año 1998 hubo una epidemia que introdujo el virus desde el continente africano al continente europeo (FAO, 2006). A través de su vector, el virus ha ido expandiéndose progresivamente hacia latitudes

(52) La **zona de neutralidad térmica** del ganado es el rango de temperaturas en el que el animal gasta la mínima energía en su termorregulación, por lo que la energía disponible para el crecimiento es máxima.

(53) El **THI** es un indicador que se emplea desde principios de los años 90 para medir el efecto combinado de la temperatura ambiental y la humedad relativa en el estado de salud del ganado. Permite calcular de manera sencilla e intuitiva los niveles de riesgo del ganado por estrés térmico, según la evolución de las condiciones ambientales. Cuando el valor del THI supere las 72 unidades, el ganado ovino empieza a experimentar estrés por calor y su tasa de productividad se empieza a alterar. Cuando el valor del THI excede de 78, la producción de leche se ve seriamente afectada. Cuando el THI se eleva por encima de 82, hay riesgo de pérdidas muy significativas en la producción, y el ganado muestran signos de estrés grave y en última instancia puede morir.

(54) La enfermedad de la **lengua azul** (BTV de sus siglas en inglés) es una enfermedad vírica aguda del ganado ovino, caprino y bovino de enorme importancia clínica por el gran deterioro físico y la larga convalecencia que provoca, y económica por las enormes pérdidas de producción y gastos de prevención y control ocasionados. Es una enfermedad muy temida pese a ser inocua para el hombre y ocasionar una mediana mortalidad en el ganado.

mayores. De hecho, los casos de infección por este virus son cada vez más frecuentes en la vertiente norte del macizo (Jacquet *et al.*, 2016), y es muy probable que su difusión aumente todavía más en futuro (Bonizzoni *et al.*, 2013). Su expansión se asocia a factores climáticos, y principalmente a la mayor supervivencia del vector a causa de los inviernos más cálidos y a cambios en el régimen de los vientos (Jacquet *et al.*, 2016), en parte inducidos por el cambio climático (Mardulyn *et al.*, 2013). Otro ejemplo significativo concierne a la garrapata común del ganado. Las garrapatas son vectores transmisores de bacterias, protozoos y virus causantes de enfermedades como la borreliosis de Lyme, la fiebre botonosa mediterránea, el virus de la fiebre hemorrágica de Crimea-Congo y el virus de la encefalitis. El desarrollo, supervivencia y dinámica poblacional de las garrapatas depende de un conjunto de factores entre los que se encuentran la influencia del cambio climático a través de su impacto en las temperaturas medias, mínimas y las alteraciones del ciclo hidrológico (Randolph *et al.*, 2008) y el cambio en la distribución de sus principales huéspedes (Léger *et al.*, 2013; Williams *et al.*, 2015). En consecuencia, es altamente probable que el cambio climático provoque cambios en la distribución y densidad de las poblaciones de insectos vectores como las garrapatas, así como en el riesgo de transmisión de los patógenos que hospedan. Además, la dinámica estará también condicionada por otros factores no climáticos como la evolución de las poblaciones de sus principales huéspedes en los Pirineos (principalmente grandes vertebrados), y por las modificaciones y fragmentación del paisaje, entre otros.

A la luz de las principales investigaciones y a pesar de las incertidumbres inherentes a las proyecciones climáticas futuras, las consideraciones sobre la vulnerabilidad del sector ganadero al cambio climático deberían ser consideradas en la planificación de las inversiones y en los instrumentos de financiación actuales del sector (ej. Fondo de Desarrollo Rural), con el fin de aumentar su resiliencia al cambio climático, y que éste no suponga una presión añadida a los diversos desafíos de naturaleza socioeconómica a los que a día de hoy se enfrenta el sector.

De hecho, aunque el cambio climático se posiciona como un gran desafío para el sector, es altamente probable que los factores y barreras socioeconómicas a las que se enfrenta el agropastoralismo de los Pirineos (globalización, fluctuación de los precios, abandono de la actividad, falta de renovación generacional, dependencia de las subvenciones, mayores costes de producción y de las inversiones necesarias etc...) seguirán siendo en futuro la fuente principal de vulnerabilidad (Leclère *et al.*, 2013; Busqué *et al.*, 2016).

Por ello, y para asegurar que las posibles medidas de adaptación del agropastoralismo sean eficaces y eficientes, será necesario que su concepción y diseño se lleven a cabo desde el prisma de escenarios futuros de cambio global, en los que el cambio climático se posiciona como un estrés añadido capaz de agravar la magnitud de los desafíos actuales.

3.2.4. Conclusiones y recomendaciones

La productividad de los sistemas agrícolas depende críticamente de las condiciones climáticas. En general, los efectos del cambio climático en la productividad agrícola se pueden resumir como el resultado de las interacciones entre el aumento de la concentración de CO₂ atmosférico, la variación en la longitud de la estación de crecimiento, los cambios en la disponibilidad de recursos hídricos, y la susceptibilidad a plagas y enfermedades. Aunque existen pocos estudios específicos sobre los efectos del cambio climático en el agropastoralismo de montaña en los Pirineos, los primeros enfoques parecen coincidir en un posible aumento del rendimiento de los pastos debido a la prolongación de la temporada de crecimiento, puesto que en altura la temperatura resulta ser el factor mayormente limitante. Sin embargo, es de esperar que el cambio climático afecte negativamente a la productividad de muchos cultivos agrícolas, así como a la producción ganadera: efectos negativos del cambio climático o intensificados por este como: mayor evapotranspiración de los cultivos, la mayor difusión de plagas y organismos patógenos y la mayor frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos, podrían suponer serios desafíos al sector en el próximos años.

Si bien las estrategias de adaptación a corto plazo podrán basarse en el empleo de prácticas agrícolas relativamente sencillas relacionadas con cambios en las fechas de siembra o en las variedades cultivadas, a largo plazo esto podría no ser suficiente. En este sentido, es esencial colmar las lagunas de conocimiento sobre los impactos del cambio climático en los principales cultivos y agroecosistemas de montaña. También será de vital importancia apoyar a los agricultores y ganaderos en el proceso de adaptación, con vistas a aumentar la resiliencia del tejido agropastoral del Macizo ante los desafíos climáticos. A continuación se presentan de manera sintética y no exhaustiva los principales desafíos a los que debe y deberá hacer frente el sector primario pirenaico en los próximos decenios, así como algunas recomendaciones para su proceso de adaptación.

Las recomendaciones se presentan según tres tipologías de medida de adaptación: medidas verdes, grises y blandas.

Principales desafíos

- Reducir las incertidumbres sobre los mayores riesgos, posibles efectos negativos y futuras presiones sobre los ecosistemas agropastorales de los Pirineos;
- Incrementar la resiliencia de los sistemas agropastorales de montaña frente a las presiones del cambio climático;
- Potenciar la gestión conservativa de los suelos para aumentar su fertilidad natural, y maximizar su rol como sumidero de carbono y reservorio de agua;
- Favorecer medidas de gestión del sector que garanticen un uso sostenible de los recursos hídricos en el marco de una gestión integral;
- Potenciar los sistemas de vigilancia de organismos patógenos y enfermedades emergentes del ganado y los cultivos;
- Limitar el abandono del sector e incentivar su diversificación y modernización en consideración a los desafíos del cambio global.

Recomendaciones

Esta sección recopila un conjunto de medidas generales destinadas a establecer las bases para el desarrollo de mecanismos que aumenten la resiliencia del agropastoralismo frente al clima futuro y su variabilidad. En todo caso, no existe una combinación eficaz de medidas preestablecidas y válidas para todos los sistemas agropastorales de los Pirineos. La gran heterogeneidad espacial y microclimática, así como la elevada diversidad de situaciones y esquemas socioeconómicos del sector en el Macizo, hacen que sea necesario realizar un estudio de vulnerabilidad específico para cada realidad local. Solo así se puede llevar a cabo un proceso de identificación de las prioridades de adaptación que permita formular un conjunto de medidas factibles, desde el punto de vista de su implementación, y óptimas en términos de eficacia y eficiencia (coste/beneficios) para adaptarse al cambio climático.

Medidas soft ⁵⁵

- Desarrollar grupos de trabajo multidisciplinares, transfronterizos y estables a largo plazo, integrados por los representantes de todos los grupos de interés (ganaderos, propietarios de explotaciones, autoridades locales, científicos etc...) que orienten el debate sobre los efectos del cambio climático en el sector a través de modelos participativos de observación;
- Promover proyectos sobre modelos de simulación agrosistémica que integren las proyecciones climáticas regionalizadas sobre la variabilidad climática futura, para evaluar los impactos potenciales del cambio climático en la producción agrícola, agropecuaria y de los pastos de alta montaña (calidad de los productos finales, evolución de las áreas idóneas para cada cultivo, etc...). Desarrollar modelos dinámicos de simulación de los distintos cultivos que permitan describir la interceptación de radiación solar por las hojas, la generación de biomasa (parte aérea y raíces), los balances de agua y de nitrógeno, y el rendimiento esperable de los cultivos;
- Fortalecer y, si fuera necesario, reorientar de forma proactiva los planes existentes de seguimiento y vigilancia de las plagas y otros organismos patógenos, de manera integrada y de acuerdo con la nueva evidencia climática y sus consecuencias. Monitorear la posible expansión de vectores favorecidos por el CC y organismos patógenos e intensificar la vigilancia y el control sobre la introducción antrópica de nuevos organismos nocivos. Desarrollar modelos que simulen el comportamiento de distintos agentes patógenos con respecto al clima, la capacidad de adaptación al biotopo y la dinámica estacional de los distintos procesos;
- Potenciar la introducción de nuevas técnicas agrícolas para ajustar el sector al cambio climático y minimizar el daño de los eventos climáticos extremos en los cultivos y el ganado. Promover la gestión sostenible de los recursos hídricos incrementando la eficiencia del uso del agua de

(55) Las **medidas Soft o medidas no estructurales** para reducir o paliar los efectos negativos del cambio climático. Esta categoría de medida está típicamente representada por los estudios de investigación enfocados a cubrir lagunas de conocimiento o para enriquecer las bases de conocimiento sobre el cambio climático, sus impactos y los sectores más vulnerables. También entra en esta categoría el desarrollo de metodologías y sistemas específicos para reducir riesgos derivados del cambio climático (ej. desarrollo de un *Early Warning System* transfronterizo para la gestión de las olas de calor en el Macizo).

riego, diversificando los cultivos de montaña mediante la introducción de nuevos cultivos o variedades más resistentes a la sequía y a la aparición de nuevas plagas y enfermedades y ajustando los períodos de siembra en respuesta a las nuevas condiciones climáticas, entre otros aspectos;

- En el sector ganadero, promover la ganadería extensiva tanto por su valor productivo (consolidación de un tejido empresarial en el medio rural, obtención de alimentos de gran calidad) como por su valor ambiental (mantenimiento de paisajes en mosaico, conservación de la biodiversidad de los pastos naturales, disminución del riesgo de grandes incendios).

- Modernizar la gestión pastoral, aunando conocimiento tradicional (prácticas trashumantes y trastermitantes, conocimiento del herbívoro,...) con nuevas herramientas tecnológicas para el seguimiento y el control del ganado. Modernizar y adaptar las instalaciones y las infraestructuras ganaderas al nuevo régimen térmico (sistemas de aislamiento y ventilación natural contra olas de calor), para garantizar en todo momento las condiciones necesarias de bienestar animal;

- Definir medidas de intervención para apoyar a los agricultores a adaptarse al cambio climático: prestación de servicios de asesoría técnica y de adaptación a los mecanismos de aseguradoras existentes.

Medidas verdes⁵⁶

- Potenciar el desarrollo de sistemas eficientes de manejo de los residuos agrícolas, con la finalidad de reutilizar todos los nutrientes naturales disponibles y reducir las aportaciones de fuera del sistema;

- Fomentar una gestión conservativa del suelo, que permita potenciar su fertilidad natural, su capacidad de actuar como sumidero de carbono, su capacidad natural de retención de agua, así como sus funciones de protección de la biodiversidad de montaña y la protección frente a los fenómenos erosivos;

- Estudiar el potencial de los excedentes de biomasa forestal en zonas de montaña para incrementar la materia orgánica de los suelos a partir de técnicas de compostaje.

Medidas grises⁵⁷

- Prestación de incentivos para la modernización de las explotaciones mediante la mejora de los sistemas de ventilación / refrigeración en los establos, potenciando en la medida de lo posible el uso de fuentes renovables (atención al gasto energético y a las emisiones de gases de efecto invernadero);

- Emplear técnicas de sombreado como las redes de sombra: efectos importantes sobre la radiación solar, pero ninguno sobre la temperatura y la humedad (intervención de bajo costo);

- Promover técnicas y medidas de gestión más eficiente del riego (subirrigación, riego por goteo y tiempos de riego adecuados).

(56) Las medidas **verdes o basadas en los servicios ecosistémicos**: esta tipología de medida incluye todas las medidas, buenas prácticas, estudios o iniciativas que tengan como principio el uso de los servicios ecosistémicos procurados por los distintos recursos naturales para paliar los efectos negativos del cambio climático (ej. silvicultura conservativa para incrementar la capacidad de los bosques del Pirineo para reducir los riesgos hidrogeológicos).

(57) Las **Medidas grises o infraestructurales** basan su acción paliativa en la construcción o implantación de elementos infraestructurales concretos (ej. construcción de diques en las zonas habitadas de alto riesgo de inundaciones torrenciales).

IDEAS CLAVE

- La disminución del periodo de heladas y el incremento de las temperaturas medias podría favorecer la expansión de cultivos no habituales en el Pirineo, como los cultivos de ámbito mediterráneo o los de origen subtropical.
- Los cultivos de secano podrían ver restringida su área de distribución potencial y su rendimiento a causa de una mayor variabilidad en el régimen de las precipitaciones y al incremento de la temperatura.
- La modificación de las áreas de distribución de algunos cultivos y la mayor sensibilidad/susceptibilidad de los mismos por las condiciones de estrés climático pueden propiciar cambios en la distribución y difusión de las actuales enfermedades y plagas de los cultivos, así como aumentar el riesgo de expansión de nuevas enfermedades.
- El incremento medio de las temperaturas y los eventos extremos están influyendo tanto en la productividad como en la composición de los pastos naturales de montaña en los Pirineos.
- El cambio climático pueden incidir negativamente en la producción animal a través de la menor disponibilidad de pastos de calidad y agua, la mayor difusión de enfermedades y sus vectores y las olas de calor a través del estrés térmico y su impacto en la salud de los animales.
- El cambio climático se posiciona como un factor de estrés añadido capaz de actuar en sinergia con los cambios de uso del suelo, la actual tendencia de degradación de los agro-ecosistemas y el abandono progresivo de la agricultura extensiva de alta montaña.

3.3 Energía

Coordinadores: Juan Terrádez (CTP-OPCC), Idoia Arauzo (CTP-OPCC).

Autores: Juan Terrádez (CTP-OPCC), Idoia Arauzo (CTP-OPCC).

Coautores: Jeremie Fosse (eco-union), Marta García París (CEO Ecoserveis).

RESUMEN

La energía juega un papel fundamental en la vida moderna. Además, el sector es responsable de gran parte de las emisiones de gases efecto invernadero de origen humano (Edehofer et al., 2014). Al mismo tiempo, se trata de un sector vulnerable a los efectos del cambio climático tanto a nivel de abastecimiento energético (efectos sobre la producción de energía) como a nivel de la demanda. Por lo que respecta a la producción de energías renovables, es previsible que el cambio climático afecte de manera negativa a la producción hidroeléctrica, termoeléctrica y eólica en los Pirineos, mientras que los efectos en la producción de la energía fototérmica⁵⁸ y fotovoltaica⁵⁹ podrían ser positivos en ciertas zonas.

Los cambios esperados en la cantidad y distribución espacial y temporal de las precipitaciones, su influencia en la disminución de los caudales de los principales ríos y su implicación directa en la capacidad de acumulación en presa y embalses, muy probablemente reduzcan la capacidad de producción hidroeléctrica de las centrales minihidráulicas a monte, y en menor medida de las hidráulicas de mayores dimensiones a valle. A esto se añaden las cada vez menores y más efímeras reservas hídricas en forma de nieve y hielo. Las temperaturas siempre mayores están adelantando la fecha de fusión de las nieves y el hielo en los Pirineos, que en el pasado proporcionaban una reserva de agua más constante y explotable en verano. Además, la reducción de los caudales mínimos de los ríos, junto con el aumento de la temperatura del agua, muy probablemente impondrá limitaciones a la capacidad de generación de energía termoeléctrica debido a la menor eficiencia de los sistemas de refrigeración de las centrales termoeléctricas, especialmente durante la temporada de verano. Aunque en menor medida,

las mayores temperaturas medias y especialmente las máximas estivales, podrían tener un impacto negativo en el rendimiento del ciclo termodinámico, disminuyendo la eficiencia de las centrales.

Los impactos positivos esperados se harán notar probablemente a través de un incremento del potencial de producción de algunas energías renovables. En particular, la capacidad de producción de energía solar fotovoltaica y fototérmica podría verse favorecida debido a un mayor grado de insolación, vinculada a la disminución de la capa de nubes.

Por el contrario, el cambio en el régimen y disminución de la velocidad de los vientos previsto para los próximos decenios en los Pirineos, podría incidir de manera negativa en la capacidad de producción de energía eólica en ciertas zonas del Macizo. También el aumento previsto de la frecuencia y la intensidad de los fenómenos climáticos extremos podría suponer una amenaza para los sistemas de producción energética por una mayor exposición de las infraestructuras de almacenamiento, transmisión y distribución de electricidad a los riesgos climáticos. En cuanto a la evolución de la demanda de energía en el Macizo, se espera un escenario de demanda caracterizado por un aumento significativo de la demanda energética media estival y demandas pico, en respuesta a las necesidades crecientes de energía para aclimatación de las viviendas a causa de los veranos cada vez más cálidos y de las olas de calor cada vez más frecuentes. Este aumento de la demanda estival podría verse compensado aunque sólo en parte por la disminución de la demanda eléctrica invernal para las calefacciones, en respuesta a los inviernos cada vez más suaves.

3.3.1 Disminución de la capacidad de producción de energía hidroeléctrica

El sector energético en los Pirineos está marcado por la importancia del sector hidroeléctrico en ambas vertientes del Macizo. Las cuencas hidrográficas del

(58) Los **sistemas fototérmicos** convierten la radiación solar en calor y lo transfieren a un fluido de trabajo. El calor se usa entonces para calentar edificios, agua o mover turbinas para generar electricidad.

(59) La **energía solar fotovoltaica** es una fuente de energía que produce electricidad de origen renovable, obtenida directamente a partir de la radiación solar mediante un dispositivo semiconductor denominado célula fotovoltaica, o bien mediante una deposición de metales sobre un sustrato denominada célula solar de película fina.

Ebro, del Garona y las cuencas interiores de Cataluña tienen una elevada importancia desde el punto de vista energético tanto a nivel regional como nacional. Para la cuenca hidrográfica Ebro- Pirineos, la potencia hidroeléctrica instalada ronda los 1080 GWh (REE, 2017), y supone más del 50% del potencial hidroeléctrico instalado en todo el territorio pirenaico (IAEST, 2016). Por lo que respecta la vertiente francesa, en Occitanie el 49 % del potencial energético regional instalado corresponde a la energía hidroeléctrica (Bilan électrique, 2016), mientras que en Nouvelle-Aquitaine ronda el 15% (RTE Nouvelle-Aquitaine, 2016). Por otro lado, Andorra se encuentra en una posición singular, en cuanto que su territorio se ubica enteramente en zona montañosa, y su sistema energético está caracterizado por la importación de gran parte de la energía empleada en el Principado.

Impactos observados:

La cantidad de energía eléctrica generada por las centrales hidroeléctricas depende en parte de la potencia instalada, pero sobre todo de la disponibilidad de recursos hídricos acumulados en las presas, en el caso de las centrales de embalse⁶⁰, y de las variaciones del caudal de los ríos, en el caso de centrales de agua fluyente⁶¹. El abastecimiento de agua depende en gran medida de la estacionalidad del ciclo hidrológico, y concretamente del régimen de las precipitaciones y del calendario en el ciclo de deshielo de la nieve. El cambio climático está modificando tanto el régimen de las precipitaciones como el calendario del deshielo (Lopez-Moreno *et al.*, 2013), con efectos considerables tanto en la capacidad de acumulación de los embalses como en el caudal de los principales ríos (Moran-Tejeda *et al.*, 2017).

Como resultado de la fusión anticipada de la nieve a causa de las altas temperaturas, en los últimos decenios se ha anticipado el pico primaveral del caudal de los ríos pirenaicos, resultando en un aumento en los caudales invernales y una disminución de los caudales estivales (Morán-Tejeda *et al.*, 2017). Esto está provocando una mayor variabilidad interanual en la producción de energía hidroeléctrica. A los efectos de la mayor variabilidad de las precipitaciones y de los cambios en el calendario de fusión de las nieves, se

suman además la mayor frecuencia e intensidad de las sequías, que en 2003, 2005, 2007 y 2012 ya provocaron disminuciones considerables de la producción de energía hidráulica tanto en la cuenca del Ebro como en la del Haute- Garonne (Van Vliet *et al.*, 2016).

Impactos previstos:

Es altamente probable que la mayor variabilidad climática prevista para las próximas décadas afecte negativamente a la capacidad de producción hidroeléctrica en la cordillera. La reducción de los caudales superficiales de los ríos, y los cambios estacionales en la disponibilidad de los recursos hídricos previstos por los principales modelos, sugieren una mayor disponibilidad de agua durante los meses invernales, acompañada por un descenso muy pronunciado de la disponibilidad hídrica durante la estación estival (Bangahs *et al.*, 2013; Michelle *et al.*, 2013; Morán-Tejeda *et al.*, 2017). Por otro lado, si las temperaturas medias siguen subiendo, disminuirán todavía más las reservas hídricas en forma de nieve (Lopez-Moreno *et al.*, 2013). El fenómeno del deshielo, además de reducirse considerablemente en magnitud, muy probablemente adelanta su calendario y como consecuencia los picos de deshielo se registren en épocas del año donde los embalses y presas ya podrían encontrarse al límite de su capacidad máxima (Beniston *et al.*, 2013). Por el contrario, los aportes hídricos por deshielo típicos de primavera serán cada vez más escasos, disminuyendo las reservas hídricas acumuladas para la temporada estival, momento del año en que además se suma la mayor demanda de energía para refrigeración, y de recursos hídricos para la agricultura y ganadería (Finger *et al.*, 2012). Si tales proyecciones se confirmaran, la capacidad de producción de energía hidroeléctrica en los Pirineos podría disminuir hasta un -10% de media, y alcanzar incluso el -35% durante la estación estival en 2070 respecto a la época actual (Rojas *et al.*, 2012; Van Vliet *et al.*, 2016), coincidiendo con los valores estimados a mayor escala de detalle para la vertiente sur del Pirineo oriental (Bangash *et al.*, 2013). No obstante, una estimación cuantitativa precisa de la entidad de estos cambios a nivel de detalle resulta indiscutiblemente compleja. Tal como se indica en el capítulo 1. Clima y variabilidad climática en los Pirineos, existen notables incertidumbres asociadas a la

(60) Las **centrales de embalse** son el tipo más frecuente de central hidroeléctrica. Utilizan un embalse para almacenar agua e ir graduando el caudal que pasa por la turbina. Es posible generar energía durante todo el año si se dispone de reservas suficientes.

(61) Las **centrales de agua fluyente**, también denominadas «centrales de filo de agua» o «de pasada», utilizan parte del flujo de un río para generar energía eléctrica. Operan de forma continua ya que al no disponer de embalses, no tienen capacidad para almacenar agua. Turbinan el agua disponible en el momento, limitadas por la capacidad instalada. En estos casos las turbinas pueden ser de eje vertical, cuando el río tiene una pendiente fuerte, u horizontal, cuando la pendiente del río es baja.

estimación de la variabilidad climática futura respecto al comportamiento de las precipitaciones en un sistema tan complejo a nivel climático y tan heterogéneo a nivel orográfico como los Pirineos, entre otros motivos. Si bien no se constata un descenso claro de las precipitaciones medias, sí que se observan cambios en los patrones climáticos de las precipitaciones. Además de afectar a los valores medios anuales y mensuales, esta complejidad hace que la estimación de los valores relativos a los episodios de precipitaciones cortas y especialmente intensas sea particularmente difícil. En cambio son estimaciones fundamentales para determinar la formación de avenidas (ver más información en el capítulo 3.4. Riesgos naturales) y los aportes hídricos totales (ver capítulo 2.6. Recursos hídricos).

3.3.2 Disminución de la eficiencia en la producción de energía termoeléctrica⁶²

También la generación de energía termoeléctrica podría verse afectada por el cambio climático a través de la reducción de los recursos hídricos disponibles para refrigeración de las centrales, y, aunque probablemente en menor medida, por una disminución de la eficiencia del ciclo termodinámico provocado por las altas temperaturas (Wilbanks *et al.*, 2007).

Impactos observados y previstos:

El aumento de la temperatura atmosférica podría desembocar en una reducción en la eficiencia del proceso de transformación termoeléctrica⁶³. El incremento de la temperatura de las aguas empleadas para refrigeración de las centrales, podría ralentizar el proceso de enfriamiento e imponer una disminución en la capacidad de producción, sobre todo durante la estación estival y durante los períodos de caudal mínimo (Eskeland *et al.*, 2008).

Además, el aumento de la temperatura de los ríos junto, con la reducción esperada en los caudales durante la estación estival (Van Vliet, 2016; Morán-Tejeda *et al.*, 2017) podría desembocar en potenciales restricciones por incumplimiento de las directiva europea en materia de caudales mínimos (el caudal ecológico mínimo⁶⁴

establecido por la Directiva Marco de Aguas 2000/60/CE), imponiendo limitaciones a la descarga de aguas de refrigeración y a la producción termoeléctrica. Finalmente, el aumento de la temperatura atmosférica produce una reducción de la eficiencia del proceso de transformación termoeléctrica, provocado por la disminución de la densidad del aire de suministro que alimenta las turbinas (Hewer *et al.*, 2006).

3.3.3 Cambio climático y energías renovables

El cambio climático puede influir sobre la capacidad de generación de algunas energías renovables ampliamente extendidas en los Pirineos, como son la energía solar fotovoltaica y fototérmica, o la energía eólica. Los cambios en el comportamiento de algunas variables clave como la velocidad y distribución de los vientos, el grado de nubosidad o la transmisividad de la atmósfera, puede tener efectos significativos en la capacidad de producción de estas energías, de distinta magnitud y signo según la fuente de energía y lugar considerados.

Impactos observados y previstos:

Según los principales estudios realizados hasta la fecha, el sector fotovoltaico y fototérmico podrían verse moderadamente favorecidos en futuro a causa del cambio climático (Bartók *et al.*, 2010; Crock *et al.*, 2011; Jerez *et al.*, 2015; Wild *et al.*, 2015; Vliet *et al.*, 2016). La probable modificación del contenido en vapor de agua de la atmósfera, así como la variación del índice de nubosidad y de las características de las nubes, podrían tener efectos directos sobre la transmisividad de la atmósfera a los rayos del sol. En el suroeste Europeo, incluida la cordillera de los Pirineos, se espera un aumento de la irradiación solar media en las próximas décadas (Bartók *et al.*, 2010; Gaetani *et al.*, 2014; Jerez *et al.*, 2015) que podría variar entre 5-10% en verano y otoño, y entre -2% y + 8% en invierno y primavera (Pašičko, 2010). Según Jerez *et al.*, 2015, y Gaetani *et al.*, 2014 esto podría suponer un aumento de la capacidad potencial de producción de energía fotovoltaica de hasta el 10 ± 3 % para el 2070-2099 respecto al período de referencia 1970-1999.

(62) Se denomina **energía termoeléctrica** a la forma de energía que resulta de liberar el agua por medio de un combustible para mover un alternador y producir energía eléctrica.

(63) Proceso que consiste en el empleo de un combustible para transformar el agua en vapor, que accionan a su vez las turbinas o alternador que producirán la energía.

(64) La expresión **caudal ecológico**, referida a un río o a cualquier otro cauce de agua corriente, es una expresión que puede definirse como el agua necesaria para preservar los valores ecológicos en el cauce del mismo, como: los hábitats naturales que cobijan una riqueza de flora y fauna, las funciones ambientales como dilución contaminantes, amortiguación de los extremos climatológicos e hidrológicos, preservación del paisaje.

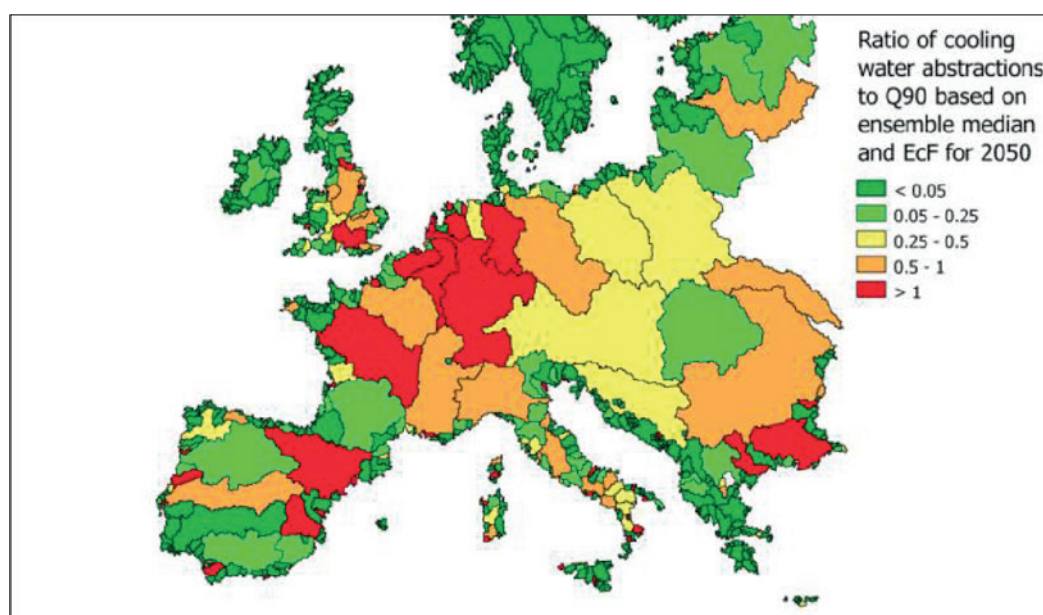


Figura 3.3.2. Estimación del impacto del cambio climático en la eficiencia de los procesos de refrigeración de las centrales termoeléctricas en el 2050, según el escenario de emisión A1B, sin medidas de adaptación. Los valores que se muestran en la leyenda se refieren a la posible intensidad del impacto, en relación al promedio europeo. Fuente: proyecto ClimWatAdapt, 2011.

Otro estudio realizado a escala global concluye que para el período 2051-2080 el potencial de producción de energía fototérmica podría aumentar hasta en un 10% respecto al 2010, mientras que la producción fotovoltaica aumentaría en menor magnitud, con incrementos de alrededor del 3,5% (Crook *et al.*, 2011), algo menos que las estimaciones de Jerez *et al.*, 2015 y Gaetani *et al.*, 2014.

Sin embargo, hay que considerar que el aumento de las temperaturas también podría influir negativamente en la eficiencia de las células fotovoltaicas. En concreto, se ha estimado que las células de silicio cristalino reducen su eficiencia alrededor del 0,4-0,5 % por cada 1°C de aumento de la temperatura media (Pašičko, 2010). Si se asume un aumento de la temperatura media de 1,5 °C para el período 2050-2070 (previsiones de los escenario más optimistas), el impacto sobre la eficiencia de las células fotovoltaicas, sin considerar los posibles avances tecnológicos emergentes, podría suponer una reducción del -0,75% de la eficiencia respecto a la actual.

Respecto a la generación de energía eólica, los estudios más recientes coinciden en que el cambio climático tendrá un impacto negativo en el potencial de producción de energía eólica en los Pirineos (Santos *et al.*, 2014; Gonçalves-Ageitos *et al.*, 2015; Tobin *et al.*, 2015). Los cambios previstos en el patrón de los vientos y la esperada reducción de la velocidad diaria media de los vientos en superficie (hasta -9% más lentos) podrían reducir el potencial de producción de energía eólica en alrededor de $-1 \pm 0,5$ MWh/día en el próximos decenios respecto a los valores actuales.

Dicha reducción se estima que sea mucho más marcada durante la época estival y otoñal que durante los meses de invierno y primavera, estaciones durante las cuales incluso podría aumentar relativamente el potencial eólico en algunas zonas (Santos *et al.*, 2014). Las áreas más afectadas por esta disminución serían el pirineo central y el oriental, mientras que en la vertiente atlántica de la cordillera no se esperan variaciones sustanciales, e incluso, según algunos modelos, el potencial eólico podría hasta aumentar ligeramente (Gonçalves-Ageitos *et al.*, 2015).

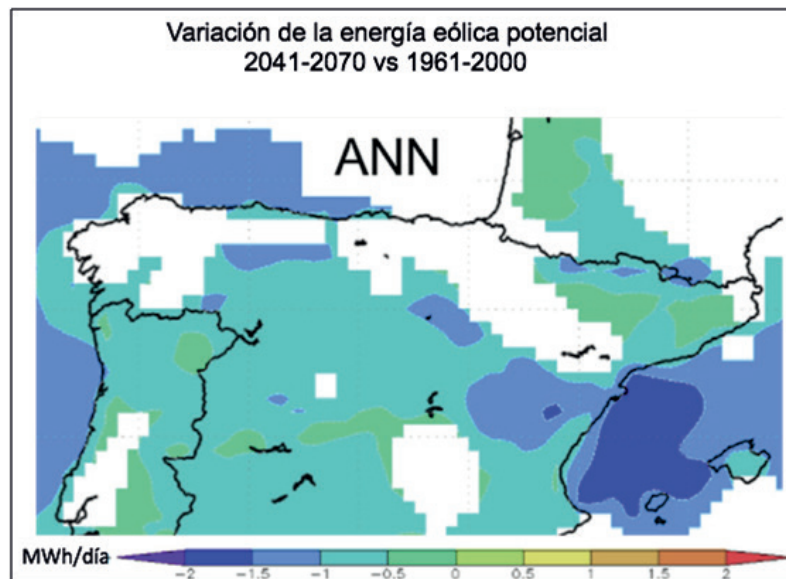


Figura 3.3.3. Variación estimada de la energía eólica potencial anual para el trentenio 2041-2070 respecto a los valores medios del período 1961-2000, empleando el modelo COSMO-CLM y el escenario de emisiones A1B. Fuente: Santos et al., 2014

3.3.4 Variación estacional de la demanda energética

La aclimatación de los hogares y otros espacios es responsable de una fracción considerable de la energía usada en Europa (EEA, 2017). Las necesidades de calefacción y refrigeración dependen en gran medida de las condiciones meteo-climáticas, y sobre todo de las temperaturas. Los principales estudios realizados sobre la materia (PESTA II, ClimateCost, POLES, ESNSEMBLES) coinciden en que la demanda estacional de energía en Europa ha sufrido fluctuaciones considerables en las últimas décadas debido al cambio climático y lo seguirá haciendo también en el futuro.

Impactos observados y previstos:

Aproximadamente un tercio de la demanda energética destinada a calefacción de los hogares europeos es abastecida a través de electricidad

(Mideksa y Kallbekken, 2010). En cambio, la demanda energética para enfriamiento mediante aires acondicionados se cubre exclusivamente con electricidad. En las últimas décadas los inviernos cada vez más suaves y los veranos más calurosos y marcados por las olas de calor han provocado cambios en la estructura de la demanda energética para calefacción y refrigeración de hogares y locales. Para valorar el seguimiento de la demanda energética relativa a las necesidades de calefacción y refrigeración, la mayor parte de estudios emplean un indicador denominado HDD⁶⁵ (grado-día de refrigeración, de las siglas en inglés *Heating Degree Days*) y CDD⁶⁶ (grado-día de calefacción de las siglas en inglés *Cooling Degree Day*). Ambos indicadores hacen referencia a la cantidad de energía necesaria para calentar o refrigerar las viviendas hasta una determinada temperatura de confort. Entre 1981 y 2014 ha habido una reducción del valor del indicador de -8 ± 2 HDD/año, a causa de los inviernos más suaves (figura 3.3.4). En cambio, durante el mismo

(65) El **grado-día de calefacción (HDD)** es una medida diseñada para cuantificar la demanda de energía necesaria para calentar un edificio. HDD es función directa de la temperatura del aire exterior. Los requisitos de calefacción para un edificio dado en un lugar específico se consideran directamente proporcionales al número de HDD en ese lugar.

(66) El **grado-día de enfriamiento (CDD)** es una medida análoga al HDD que refleja la cantidad de energía utilizada para enfriar un hogar o negocio. El valor de base del HDD y del CDD se define como la temperatura a la que no hay necesidad de refrigeración y calefacción (Schaeffer et al, 2012).

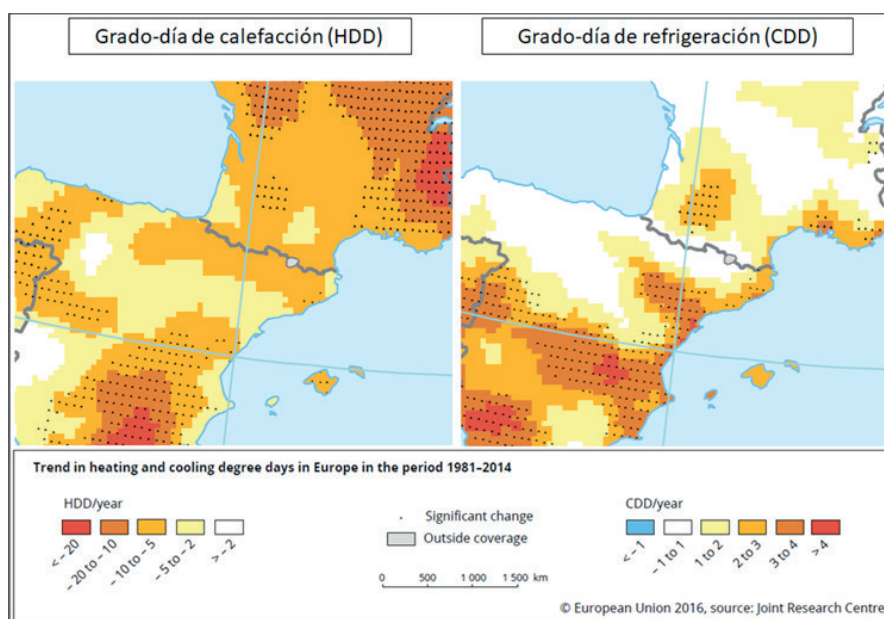


Figura 3.3.4. Evolución de los indicadores HDD (izquierda) y CDD (derecha) en el periodo comprendido entre 1981 y 2014 en los Pirineos. Fuente JRC. 2016

periodo se ha registrado un incremento de $+2 \pm 1$ del CDD /año, a causa de los veranos cada vez más cálidos (EEA. 2016).

Según las proyecciones de la evolución de estos dos indicadores realizadas en el contexto del proyecto europeo ENSEMBLES, para finales de siglo se prevé una reducción paulatinamente mayor de las necesidades energéticas para calentamiento de los hogares durante la estación invernal y un incremento de las necesidades energéticas para enfriamiento en los sectores civil, industrial y de servicios.

Cabe señalar que el aumento de la demanda energética para cubrir las necesidades crecientes de refrigeración (picos de demanda), ocurrirá muy probablemente en momentos del año críticos para la generación de energía hidroeléctrica y con posibles limitaciones en el uso de recursos hídricos para refrigeración de las centrales termoeléctricas (Förster y Lilliestam, 2009). A esto hay que añadirle los extremos climáticos, que provocan estos efectos en la demanda y oferta energética, serán cada vez más frecuentes e intensos. En concreto, es muy probable que durante la estación estival los picos de demanda energética aumenten cada vez más para poder hacer frente a los calurosos veranos, al mismo tiempo que la capacidad de producción de energía disminuya por la menor disponibilidad de recursos hídricos para la producción hidroeléctrica.

3.3.5 Incremento del riesgo de daños a las infraestructuras energéticas

La mayor frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos, podría suponer una amenaza para la integridad de los sistemas de producción de energía desde el punto de vista de las infraestructuras de almacenamiento, transmisión, transformación y distribución de electricidad en los Pirineos (Sathaye *et al.*, 2011; Muriel *et al.*, 2016).

Impactos observados y previstos:

Muchas de las infraestructuras que conforman los sistemas de transmisión y transformación de energía en ambas vertientes de los Pirineos están particularmente expuestas a los riesgos climáticos y a los riesgos naturales inducidos o potenciado por estos. Por un lado, las infraestructuras energéticas se caracterizan por tener vidas medias relativamente largas (20 a 80 años) y por ello están particularmente expuestas a dichos riesgos a largo plazo. Por otro lado, gran parte de la red se ubica en áreas del territorio a riesgo de inundaciones, con pendientes acusadas a menudo inestables o afectadas por movimientos de masas y desprendimientos de rocas frecuentes, típicos de los ambientes de montaña. Además, el cambio en el régimen de las precipitaciones, podrían desembocar en un mayor número de periodos de lluvia cortos pero

excepcionalmente intensos, actuando como factor desencadenante de muchos riesgos geológicos e hidrológicos. Otros eventos climáticos extremos que probablemente aumenten su frecuencia en futuro, como los fuertes vientos y tempestades, pueden provocar la caída de árboles y postes eléctricos, causando daños en las redes de distribución y provocar como consecuencia interrupciones temporales en la distribución de electricidad. Finalmente, durante las olas de calor, las altas temperaturas podrían provocar fallos en los transformadores de energía eléctrica, alterando temporalmente el abastecimiento de energía eléctrica (Karl *et al.*, 2009 y Sathaye *et al.*, 2011). Dado que a día de hoy no existen estudios cuantitativos sobre estos impactos en los Pirineos, resulta pertinente evaluar con mayor profundidad los niveles de riesgo de las infraestructuras energéticas derivados o inducidos por el cambio climático. Un análisis más exhaustivo y cuantificativo permitiría valorar si este aspecto del cambio climático requiere la adopción de medidas específicas para evitar o mitigar el daño potencial. No obstante, y como medida preventiva a corto y medio plazo, es importante que se adapten los diseños y condiciones de operación de las infraestructuras energéticas de nueva construcción para hacerlas más resilientes a los riesgos climáticos, aprovechando las lecciones aprendidas de otras zonas de montaña.

3.3.6 Conclusiones y recomendaciones

El sector energético es particularmente vulnerable a los impactos del cambio climático. Sin embargo hay que tener presente que el propio sistema de producción y consumo energético es la primera causa del propio cambio climático. En este sentido los Pirineos tienen un gran potencial de aprovechamiento de energías renovables, en especial, de biomasa, solar y eólica. Está previsto que el cambio climático modifique el comportamiento de la oferta y la demanda de energía en las próximas décadas. La disminución en la disponibilidad de agua y el aumento de temperatura a causa del cambio climático podrían limitar la capacidad de producción de energía hidráulica y termoeléctrica, lo cual podría suponer la reducción de la oferta energética en períodos críticos de pico de demanda. En este sentido, durante los veranos, cada vez más cálidos y caracterizados por olas de calor más intensas y frecuentes, se darán cambios en el esquema de la demanda energética, aumentando y concentrándose cada vez más el pico de demanda en esta época. Esta desincronización entre los periodos de mayor demanda y los períodos de menor capacidad de producción de energía, podría desembocar en potenciales tensiones entre distintos sectores socioeconómicos en relación a los recursos hídricos, especialmente en verano por un escenario de escasez creciente. De hecho, es previsible

que estos impactos combinados del cambio climático sobre los recursos hídricos dificulte que se satisfagan totalmente las necesidades hídricas para el sector agrícola, energético, social (p.e turismo) y ambiental. Por ello, la implementación de medidas transversales e integradas de adaptación al cambio climático se configura como un elemento fundamental para asegurar la resiliencia de estos sectores frente a los desafíos climáticos.

Principales desafíos

- Diversificar las fuentes de energía priorizando las fuentes de energías renovables
- Fomentar la transición a un modelo de generación de energía distribuida en sustitución al modelo de producción centralizada actual
- Optimizar la producción energética y el uso de recursos hídricos en la producción de energía hidroeléctrica y termoeléctrica (modelo de Smartgrid)
- Adecuar la gestión del sector energético a las posibles variaciones de la demanda
- Profundizar sobre las potenciales limitaciones del sistema energético actual frente a los desafíos climáticos
- Identificar posibles oportunidades emergentes
- Promover medidas y campañas de ahorro energético
- Asegurar la adaptación progresiva de las infraestructura eléctricas e hidráulicas a la dinámica futura de la demanda
- Identificar los nodos de la red de distribución energética ubicados en los territorios de montaña más críticos por su exposición a los riesgos climáticos, hidrológicos y geológicos
- Asegurar una buena capacidad de respuesta y recuperación de la red de distribución ante eventos climáticos extremos

Recomendaciones

En esta sección se listan una serie de recomendaciones de adaptación destinadas a facilitar el proceso de diseño y desarrollo de mecanismos para incrementar la resiliencia del sector energético frente al clima futuro y su variabilidad. Cabe mencionar que no existe una

combinación de medidas preestablecidas eficaz, y que según el sistema de producción energética en cuestión, así como la localización geográfica específica de las infraestructuras de producción, transporte y acumulación, serán más prioritarias unas acciones u otras.

También es importante considerar el carácter particularmente transversal del sistema energético, tanto en la valoración detallada de los impactos previstos como en la definición de posibles medidas de adaptación. Esta transversalidad es especialmente patente en la cuestión de los recursos hídricos y en los aspectos relacionados con las políticas y objetivos de mitigación. Es imprescindible considerar todos estos aspectos para poder establecer prioridades antes de formular e implementar un conjunto de medidas óptimas en términos de eficacia y eficiencia (coste/beneficios) para aumentar la resiliencia del sector al cambio climático en el ámbito pirenaico.

Medidas soft⁶⁷

- Integrar las consideraciones sobre la evolución de las variables climáticas y sus implicaciones en la demanda energética anual en los sistemas actuales de pronóstico de crisis y picos de demanda, así como en las campañas de sensibilización ciudadana;
- Fomentar e incentivar sistemas térmicamente eficientes de construcción y de climatización pasiva, capaces de hacer frente al aumento de la temperatura y a los requisitos de confort térmico a bajo coste energético o coste "0" (por ejemplo: aumentar el sistema de incentivos para mejorar la eficiencia energética de edificios restaurados y de nueva construcción);
- Consolidar nuevos enfoques de modelización en relación a las proyecciones meteo e hidroclimáticas, integrando en la medida de lo posible los procesos naturales y antrópicos relevantes a nivel de cuenca;

- Integrar sistemáticamente las consideraciones relativas al caudal ecológico definido por la Directiva Marco de Aguas (2000/60/CE) en los planes y prácticas de gestión de los embalses, para garantizar las necesidades funcionales de los ecosistemas fluviales también en consideración a un escenario de agravamiento de los caudales mínimos;

- Promover estudios para valorar la sensibilidad al cambio climático de las principales fuentes de energía renovable (por ejemplo, reducir las incertidumbres sobre las implicaciones futuras del cambio climático en la producción de energía hidroeléctrica, termoeléctrica y eólica) a un nivel de detalle suficiente que permita orientar las acciones e inversiones sobre el terreno.

Medidas verdes⁶⁸

- Desarrollar sistemas de producción energética alternativos, aprovechando los recursos a escala local (ejemplo: calderas de biomasa, aprovechamiento de energía solar y eólica).

Medidas grises⁶⁹

- Favorecer la transición a un modelo de generación energética descentralizado;
- Fomentar las técnicas y materiales de construcción térmicamente eficientes y los sistemas de climatización pasiva (acristalamiento exterior doble y triple, enfriamiento por sistemas de refrigeración pasivos, empleo de "techos verdes" etc...);
- Optimizar la capacidad de acumulación de los embalses y presas existentes más críticos, para facilitar la planificación y gestión plurianual de los recursos hídricos a pesar de la variabilidad en los aportes;

(67) Las **medidas Soft o medidas no estructurales** para reducir o paliar los efectos negativos del cambio climático. Esta categoría de medida está típicamente representada por los estudios de investigación enfocados a cubrir lagunas de conocimiento o para enriquecer las bases de conocimiento sobre el cambio climático, sus impactos y los sectores más vulnerables. También entra en esta categoría el desarrollo de metodologías y sistemas específicos para reducir riesgos derivados del cambio climático (ej. Desarrollo de un *early warning System* transfronterizo para la gestión de las olas de calor en el Macizo).

(68) Las medidas **verdes o basadas en los servicios ecosistémicos**: esta tipología de medida incluye todas las medidas, buenas prácticas, estudios o iniciativas que tengan como principio el uso de los servicios ecosistémicos procurados por los distintos recursos naturales para paliar los efectos negativos del cambio climático (ej. prácticas silviculturales conservativas para incrementar la capacidad de los bosques del pirineo para reducir los riesgos hidrogeológicos).

(69) Las **Medidas Grey o infraestructurales**, son todas aquellas que basan su acción paliativa en la construcción o implantación de elementos infraestructurales concretos (ej. Construcción de diques en las zonas habitadas de alto riesgo de inundaciones torrenciales).

- Aumentar la interconectividad de las infraestructuras hídricas de mayor tamaño para incrementar la resiliencia del sistema (Integración de redes de distribución e introducción de mecanismos para el intercambio y la transferencia temporal de concesiones);
- Implementar una estrategia de intervenciones para el mantenimiento regular y puesta en seguridad de las infraestructuras especialmente vulnerables a los eventos climáticos extremos y riesgo derivados (por ejemplo: infraestructuras energéticas ubicadas en zonas a riesgo de inundación, de deslizamientos de tierra o avenidas);
- Fomentar la creación de una red eléctrica inteligente transpirenaica o “smartgrid”, favoreciendo la interconexión de plantas de producción de pequeño tamaño y de fuentes renovables, ya sean fotovoltaicas, eólicas o hidroeléctricas.

IDEAS CLAVE

- Es previsible que el cambio climático afecte negativamente a la disponibilidad de agua para la producción hidroeléctrica en los Pirineos
- La reducción de los caudales mínimos de los ríos, junto con el aumento de la temperatura del agua, muy probablemente impondrán limitaciones a la capacidad de generación de energía termoeléctrica.
- La capacidad de producción de energía solar fotovoltaica y fototérmica podría verse favorecida debido a un mayor grado de insolación, vinculada a la disminución de la capa de nubes.
- El cambio en el régimen y disminución de la velocidad de los vientos previsto para los próximos decenios en los Pirineos, podría incidir de manera negativa en la capacidad de producción de energía eólica en ciertas zonas del Macizo.
- El aumento previsto de la frecuencia e intensidad de los fenómenos climáticos extremos podría suponer una amenaza para los sistemas de producción y distribución energética.
- El calentamiento global podría provocar un aumento de la demanda estival para enfriamiento de los hogares, que podría verse compensado aunque sólo en parte por la disminución de la demanda eléctrica invernal para las calefacciones.

3.4 Riesgos naturales

Coordinación: Yvan Caballero BRGM

Redactores: Séverine Bernardie y Nina Graveline (BRGM); María del Carmen Llasat (Univ. Barcelona); C. Bouisset, Sylvie Clarimont e Isabelle Degrémont (Univ. Pau); Santiago Begueria (CSIC), Juan Ignacio Lopez-Moreno (CSIC), Vincent Jomelli (CNRS), Enrique Serrano (UVA), Yvan Caballero (BRGM).

De los desastres provocados por amenazas naturales que ocurrieron en Europa desde 1980, aproximadamente el 90% de los eventos y el 80% de las pérdidas económicas fueron causados por riesgos climáticos o hidrometeorológicos (AEMA, 2010). Dadas las condiciones del cambio ambiental global, tal y como se describe en el Quinto Informe del IPCC (2014), los impactos de los riesgos naturales sobre los sistemas naturales y humanos probablemente crecerán y se manifestarán con mayor intensidad en todo el mundo. Europa, por ejemplo, asistirá probablemente a un aumento progresivo de los riesgos climáticos en las regiones del sur-oeste (Forzieri *et al.*, 2016).

Este capítulo examina, de manera sintética, los principales elementos de conocimiento respecto a la posible influencia del cambio climático sobre los peligros asociados con los principales riesgos naturales que pueden presentarse en los Pirineos. La importancia del riesgo presentado por un determinado tipo de fenómeno natural (tormentas, sequías, inundaciones y deslizamientos de tierras entre otros) en un territorio depende de la combinación de la peligrosidad del fenómeno (que califica su aparición y su intensidad) y de la vulnerabilidad del territorio en el que se produce el fenómeno natural (que es tanto más importante cuanto mayor es la exposición de la población y los bienes a un determinado riesgo). En este capítulo, no discutiremos la noción de vulnerabilidad. Más bien, nos centraremos en una presentación del estado del conocimiento actual sobre los peligros que presentan los principales fenómenos naturales descritos en el territorio pirenaico, y su posible evolución futura. Se han considerado cinco tipos de fenómenos naturales: 1) Los eventos meteorológicos extremos, 2) las inundaciones, 3) los desprendimientos de rocas y los deslizamientos de tierra, 4) la degradación del permafrost y 5) las avalanchas. En conclusión, se presentan algunas recomendaciones en términos de acciones de adaptación a emprender.

RESUMEN

Este capítulo presenta del estado del arte de los conocimientos sobre la posible influencia del cambio climático en los peligros asociados con los principales riesgos naturales que pueden afectar a los Pirineos. En el futuro, es probable que el territorio pirenaico tenga que enfrentar un aumento de las temperaturas máximas y mínimas, de las olas de calor y de los episodios de sequía; un aumento de la frecuencia de episodios de lluvia intensa y de la intensidad de los episodios de granizo; un aumento del riesgo asociado con las crecidas y las inundaciones, a pesar de la falta de indicaciones claras sobre la evolución futura de su ocurrencia y e intensidad; una disminución de la estabilidad de los taludes y rocas en proporciones muy poco conocidas, pero que podría resultar de la combinación de la evolución futura de las precipitaciones, de las temperaturas y la probable descongelación o degradación del permafrost. El capítulo concluye con una reflexión sobre las estrategias de adaptación que deberían tenerse en cuenta a fin de hacer frente a estos acontecimientos, y recomienda una serie de medidas que pueden aplicarse para aumentar la resiliencia del territorio pirenaico a los riesgos naturales inducidos por el cambio climático.

3.4.1 Aumento de los fenómenos meteorológicos extremos

Evolución actual

El seguimiento y el análisis de la evolución de los fenómenos extremos (lluvias torrenciales, sequías, olas de calor...) es una actividad compleja no sólo por la escasez y lo repentino de sus ocurrencias (sensibilidad de las variables que se pretenden observar y los cambios progresivos en los métodos y equipos de medición utilizados para documentarlos) sino también debido a la dificultad de llegar a un acuerdo sobre la forma de definirlos. En general, los riesgos climáticos mejor documentados son la evolución de las temperaturas extremas. El IPCC (Hartmann *et al.*, 2013), propone una ilustración general (3.4.1) sobre la evolución observada en la frecuencia de los principales riesgos climáticos desde mediados del siglo XX. Estudios realizados específicamente sobre el granizo han demostrado que los episodios de granizo son más frecuentes e intensos en la cordillera de los Pirineos que en el resto de los macizos montañosos de Francia. Esto

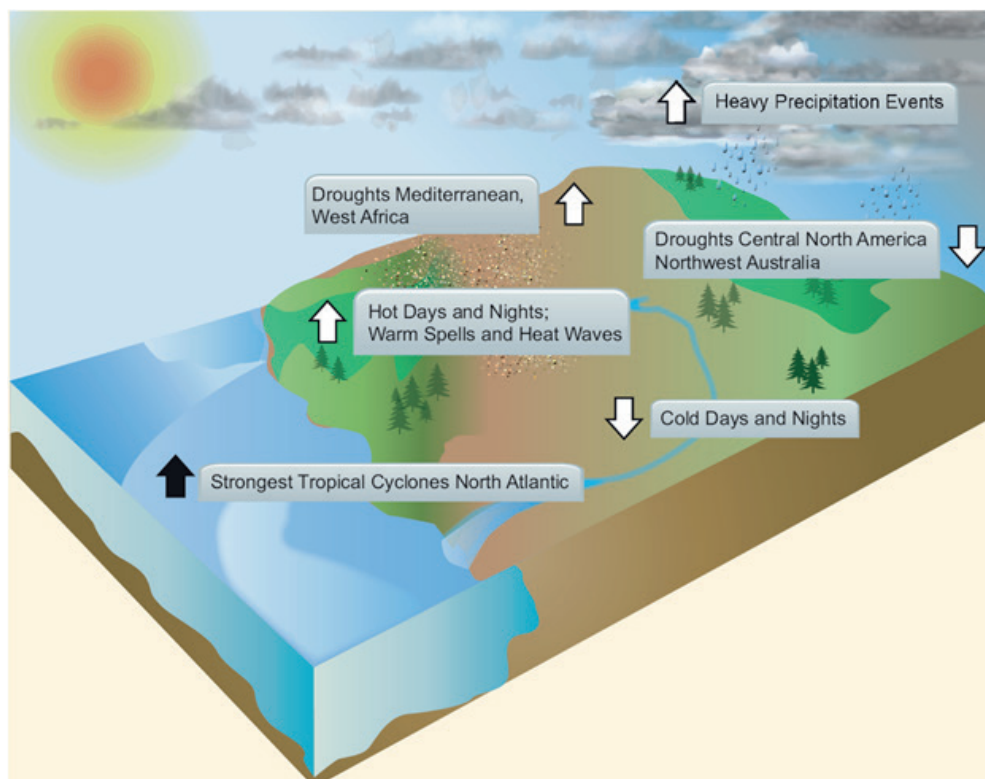


Figura 3.4.1: Evolución de las frecuencias (o intensidad) de diferentes tipos de eventos extremos (la evolución del aumento o de la disminución es indicada por la dirección de la flecha), desde mediados del siglo 20. Fuente: Hartmann *et al.*, 2013).

puede deberse muy probablemente a la influencia de las corrientes de aire húmedo que provienen de España en determinados períodos del año, y/o a los frentes de aire frío procedentes del Atlántico (Berthet *et al.*, 2011). Del registro de observaciones de los episodios de granizo en los últimos 40 años, se observa la tendencia hacia un aumento en la intensidad de los episodios, en correlación con el aumento de las temperaturas primaverales, aunque ninguna tendencia ha sido detectada en su frecuencia de ocurrencia (Berthet *et al.*, 2011).

Proyecciones futuras

La relación entre los cambios en las precipitaciones totales y la evolución de los fenómenos extremos no ha sido establecida. No obstante, las proyecciones realizadas por los modelos climáticos indican que, a

escala mundial, las precipitaciones podrían intensificarse durante la temporada de lluvias, en particular en las latitudes altas y en las regiones que se benefician de lluvias monzónicas (Collins *et al.*, 2013). En el marco del informe especial sobre eventos extremos SREX del IPCC (2012), se proyecta un aumento de la frecuencia de lluvias especialmente intensas en detrimento de las lluvias de baja intensidad. A nivel estacional, el aumento de la evapotranspiración vinculado al calentamiento global podría causar períodos de sequía más frecuentes y largos, especialmente en las regiones semiáridas como la cuenca mediterránea (Collins *et al.* 2013). Además de estas sequías, calificadas de “meteorológicas”, también las sequías “agronómicas” podrían ser más frecuentes en un futuro (ver capítulo 3.2) sobre todo en aquellas regiones donde el contenido de agua del suelo es actualmente bajo.

ENCUADRE 3.4.1: SOLUCIONES PARA LIMITAR EL IMPACTO DE LAS SEQUÍAS EN LAS CIUDADES

Varias ciudades han comenzado a implementar soluciones basadas en la creación de islotes de frescura para luchar contra el aumento de la temperatura⁶⁶. En Orléans (Francia), el desarrollo de tejados vegetalizados y de áreas verdes, la reducción de las superficies impermeabilizadas, el mantenimiento o la creación de áreas naturales mediante la plantación de especies preferentemente locales, y la gestión y renovación del patrimonio de árboles, permite a las ciudades su reconversión a “ciudades-jardín”. En Stuttgart (Alemania), se ha adoptado un reglamento de construcción vinculante, que promueve el uso de soluciones basadas en la naturaleza, y ha ayudado a que la ciudad logre cubrir el 60% de su superficie con áreas verdes. Los 1900 m² de techos verdes en el Ayuntamiento de Chicago, ejecutados según el Plan de Acción Climático de Chicago, han ayudado a disminuir la escorrentía pluvial y reduce el efecto de isla de calor urbana alrededor del proyecto piloto (PNUE, 2014).

falta de reportes. López-Moreno *et al.*, (2006) y Renard *et al.*, (2008) señalan tendencias negativas en los picos de avenidas en el Pirineo Central para los períodos 1955-1995 y 1968-2000, respectivamente; sin embargo, éstas podrían justificarse ampliamente por el aumento de la masa forestal y los cambios en usos de suelo (más información en el capítulo 3.1). Bulygina *et al.*, (2009, 2011) demostraron que en las cuencas pequeñas el aumento de la masa forestal puede inducir una reducción del caudal medio de los ríos, de hasta un 10% durante las inundaciones.

En los Pirineos, las inundaciones se producen principalmente como resultado de lluvias de gran intensidad, como “inundaciones relámpago” de respuesta rápida. Solo en pocas ocasiones el deshielo juega un papel importante, (episodio del río Garona del año 2013, donde el deshielo provocó inundaciones catastróficas que afectaron a Cataluña, Aragón, Andorra, y Pirineo Central, Agencia del Agua Adour-Garonne, (2014); Llasat *et al.*, 2017). Las avenidas en los Pirineos se han producido con mayor frecuencia en otoño, con inundaciones excepcionales en octubre de 1940 (más de 860 mm de lluvia) y noviembre de 1982 (más de 600 mm de lluvia) (Llasat *et al.*, 2017), y en 1999 (norte de Cataluña), y el mayor número de víctimas en los últimos años en el sur de Francia, Boudou, (2016). No obstante, no se ha podido detectar ninguna tendencia en estas inundaciones catastróficas (Llasat *et al.*, 2013). Por otro lado, se ha detectado un aumento en frecuencia de las inundaciones “extraordinarias” aunque los daños provocados por estas han sido menores gracias a los esfuerzos realizados en la disminución de los niveles de exposición, especialmente en zonas costeras (Llasat *et al.*, 2013). Por ejemplo, entre 1981 y 2015 ocurrieron 77 inundaciones o en Cataluña; el 23% de ellas fueron catastróficas, con un total de 100 fallecidos (Llasat *et al.*, 2017). En paralelo, 97 eventos catastróficos ocurrieron entre 1981 y 2010 en las regiones de Occitanie y Nouvelle-Aquitaine, con un total de 94 fallecidos. En Andorra se produjeron inundaciones extraordinarias en 1907, octubre de 1937 y noviembre 1982. Esta última causó víctimas mortales. Se registró un leve pero significativo incremento (0,4 eventos/década) de las inundaciones durante la época estival (julio-agosto-septiembre) en los Pirineos Catalanes. Álvarez-Rodríguez *et al.*, (2016), sostienen que desde 1950 hasta el día de hoy se han observado pocos cambios en la distribución de las estaciones más allá de 1.400 m de altitud. Estos datos ponen de manifiesto la necesidad de analizar las variaciones

3.4.2 Aumento de la frecuencia de inundaciones y crecidas

Evolución actual

Hasta la fecha, no se ha detectado una tendencia estadísticamente robusta de la evolución de las inundaciones a escala global. La única señal robusta se observa en primavera, en las regiones donde la nieve acumulada es importante y donde el caudal de las aguas superficiales está fuertemente influenciado por el deshielo (Hartmann *et al.*, 2013). El IPCC (2014) y otros estudios específicos (Hall *et al.*, 2014) señalan que la tendencia creciente registrada en los impactos de las inundaciones está más correlacionada con los cambios en los usos del suelo y el aumento de vulnerabilidad, que con el aumento de temperatura debido al cambio climático y su efecto en la precipitación (Aerts *et al.* (2018)).

Mediero *et al.*, (2014), al analizar la evolución de la descarga máxima anual en grandes cuencas de Europa, reportan más tendencias negativas que positivas para el período 1959- 2009. No es posible extender estas conclusiones a la escala de las cabeceras de cuenca por

(66) <http://uicn.fr/solutions-fondees-sur-la-nature/>

estacionales sobre la base de series pluviométricas de alta resolución temporal, lo que actualmente se encuentra limitado por la falta de observaciones in situ (especialmente en altura).

Proyecciones futuras

Es difícil desarrollar proyecciones a futuro para las inundaciones en vista de las incertidumbres relacionadas con las proyecciones para lluvias de alta intensidad y cambios en los usos del suelo (Hall *et al.*, 2014). Los informes del IPCC (2012, 2014) se limitan a presentar una proyección de la frecuencia de precipitaciones de alta intensidad (para un período de retorno de 20 años) en el sur de Europa. No obstante, se identifica como un reto a futuro, con un alto nivel de confianza, el incremento de las pérdidas económicas y humanas causadas por las inundaciones de ríos y costeras, como resultado de la creciente urbanización, del aumento del nivel del mar, de la erosión costera y de los picos de avenidas en Europa. En el caso de los Pirineos, esto podría afectar principalmente a las regiones costeras periféricas. Por el contrario, en las áreas montañosas Pirenaicas, el continuo proceso de despoblación rural y el aumento de la cubierta forestal hacen que muy probablemente la problemática afecte sobre todo a determinadas zonas turísticas (urbanización de riberas de ríos y torrentes) con un alto nivel de riesgo, como, por ejemplo, en el caso del río Garona en junio de 2013 (Llasat *et al.*, 2017), o de Biescas, en agosto de 1996 (García Ruiz *et al.*, 2004). Con respecto a las proyecciones futuras de las inundaciones, los estudios de Rojas *et al.*, (2012), no encontraron ninguna indicación significativa en las regiones del Mediterráneo Occidental. Dumas *et al.*, (2013) proyectan un aumento en la frecuencia de las inundaciones con un período de retorno de 100 años sobre el territorio francés. En lo que se refiere al índice de lluvias máximas anuales recogidas en un período de 24 horas. Turco *et al.*, (2016) han constatado cambios en la región pirenaica para el período de 2070-2100 respecto al periodo de referencia 1971-2000, que van desde menos 5% a más 5%, que serían claramente negativos en primavera y verano.

ENCUADRE 3.4.2. SOLUCIONES PARA LIMITAR LOS RIESGOS DE INUNDACIONES

Ante el riesgo de inundaciones, se han aplicado en primera instancia estrategias basadas en la construcción de infraestructuras de protección (tales como cuencas de retención asociadas a sistemas automatizados de gestión). Más recientemente, varios países han aplicado enfoques basados en la planificación urbana y destinados a la gestión del fenómeno aguas arriba⁷¹. Por ejemplo, el departamento de Seine-Saint-Denis utiliza los espacios naturales para regular las avenidas y favorecer la infiltración de las aguas de escorrentía. Un programa franco-suizo de restauración del río Rin ha permitido reducir la exposición de la población al riesgo de inundaciones restableciendo el suministro de agua en algunos ramales muertos del río, así como modificando la estructura de algunos de sus afluentes. En 2002, el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF) inició un programa para reconectar lagos en la provincia de Hubei con el Río Yangtze (China), por medio de la reapertura estacional de compuertas. Se facilita de esta manera la gestión sostenible de los lagos a través de la supresión o modificación de las infraestructuras y se aumenta el almacenamiento de las aguas de inundación (PNUE, 2014). En Suiza, cerca de Ginebra, hasta hace pocos años, el Río Aïre fluía a través de un canal. Los periodos de fuertes lluvias rompían repetidamente sus riberas y planteaban un riesgo de inundación para algunos de los barrios de la ciudad. En 2002 se inició un proyecto de protección contra inundaciones, combinado con la modernización ecológica del curso de agua. Un largo tramo del cauce se ensanchó; como resultado la descarga disminuyó y los picos de inundación en la cuenca baja se disiparon. Desde 2011, la Ley de Protección de las aguas suizas ha prescrito un espacio mínimo para ríos y arroyos. Las franjas de protección que ya existen en la actualidad a lo largo de riberas se deben ensanchar, especialmente a lo largo de cursos de agua importantes. Para esto, se necesitan cerca de 20.000 hectáreas de tierra en toda Suiza, principalmente en las zonas agrícolas. Pero esa tierra no está perdida para la agricultura; sigue siendo posible utilizarla como extensos pastizales para la ganadería y la producción de heno (FBA (2017a)

(71) <http://uicn.fr/solutions-fondees-sur-la-nature/>

3.4.3 Aumento de los deslizamientos y desprendimientos de rocas

Evolución actual y futura del número y de los tipos de deslizamientos de tierra

Los registros históricos de ocurrencia de deslizamientos (Seneritvane *et al.*, 2012) muestran una amplia variabilidad, debida a efectos locales, a incertidumbres y a efectos indeterminados. Varios estudios han demostrado que la elevación de la temperatura del aire ha redundado en el aumento de la actividad, especialmente de deslizamientos y avalanchas de rocas y hielo y de corrimientos de tierra (Stoffel y Beniston, 2006; Ravel y Deline, 2011, 2015; Huggel *et al.*, 2012, 2013; Paranzio *et al.*, 2016). Los efectos del cambio global podrían ser aún más importantes en zonas particularmente vulnerables, como las regiones de montaña. Los cambios futuros de temperatura y de precipitaciones podrían modificar la relación entre lluvia, nieve y hielo, que, en última instancia, resultará en cambios en cantidad y estacionalidad. Por lo tanto, los procesos naturales controlados por el contexto hidrometeorológico, y entre ellos, los deslizamientos, provocarán nuevas presiones sobre el medio ambiente, tanto en los sistemas sociales como naturales. El informe del IPCC (2014), indica que *“los fenómenos extremos de precipitación sobre la mayoría de las tierras en latitudes medias y en las regiones tropicales húmedas, serán muy probablemente más intensos y más frecuentes”*. Es alta la confianza en que esta evolución afectará a los deslizamientos de tierras en algunas regiones (Seneviratne *et al.*, 2012). Jomelli (2012), A. Stoffel *et al.*, (2014) y Wood *et al.*, (2016) indican que cuando aumente la frecuencia y/o la intensidad de las lluvias, también se espera que aumenten los deslizamientos superficiales, incluidos los desprendimientos de rocas, los corrimientos de tierra y las avalanchas. Sin embargo, no se puede encontrar una relación entre intensidad de precipitación y desencadenamiento de caída de rocas en varios de los fenómenos documentados en Andorra (Copons, 2004).

Más específicamente, los deslizamientos de tierra pueden ser sensibles al cambio climático a causa de seis factores relacionados con el clima (Crozier, 2010): precipitaciones totales, intensidad de las precipitaciones, temperatura del aire, velocidad y duración del viento, cambios de situación climática regional y variabilidad meteorológica resultante. Estos factores pueden afectar a diferentes procesos, como son la frecuencia de los deslizamientos. Por ejemplo, un aumento de la intensidad de las precipitaciones puede implicar una elevación del nivel freático que podría debilitar la estabilidad del terreno. El aumento de la

temperatura y la disminución de las precipitaciones pueden implicar un aumento de los incendios forestales, resultando también en una reducción de la estabilidad de taludes, debido a la falta de resistencia mecánica de las raíces. El aumento anual de la temperatura en altura puede provocar el deshielo del permafrost y el debilitamiento de la solidez de las rocas debido a la disminución de los glaciares, provocando el aumento del desprendimiento de rocas. El cambio de velocidad y de duración del viento puede implicar cambios en la evapotranspiración y, por consiguiente, en la humedad del suelo. En zonas de montaña, estos fenómenos dañan periódicamente infraestructuras críticas y desbaratan redes de transporte regionales con consecuencias socio-económicas (Utasse *et al.*, 2016).

Situación a escala de los Pirineos

A escala de los Pirineos, se han analizado las condiciones climáticas y geomorfológicas para explicar la ocurrencia de deslizamientos (Lorente *et al.*, 2002), pero poco se ha hecho hasta la fecha sobre la cuestión de la evolución futura de estos fenómenos en relación con el cambio climático. Se espera que la mayor frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos aumente la exposición de obras de infraestructura y viviendas a los riesgos de inundaciones, avalanchas y deslizamientos (ONERC, 2009). El riesgo de incendios forestales, debido a la elevación de la temperatura media, podría resultar en un aumento de procesos controlados por la gravedad tales como erosión, deslizamientos y derrumbes. Además, el aumento de las temperaturas y la modificación de los flujos subterráneos también podrían desestabilizar los suelos. En los Pirineos, el aumento de los deslizamientos se asocia con las lluvias torrenciales y la desaparición de la vegetación, o la sustitución de la vegetación autóctona por otra con menor arraigo. Los planes de ordenación urbana son por lo tanto una herramienta importante para la adaptación al aumento de estos fenómenos.

3.4.4 Mayores riesgos relacionados con la degradación del permafrost

La presencia de permafrost (capas del suelo o del subsuelo de 50 cm a 8 m de espesor, permanentemente congeladas), se debe al efecto combinado de diversas condiciones: climáticas (en particular: temperatura, precipitación, viento y radiación solar); topográficas (“efectos de barrera” o influencia sobre el viento) y locales (manto nivoso, cubierta vegetal, disponibilidad de agua, y tipos de formaciones pedogeológicas) (Gruber *et al.*, (2017)). Allen *et al.*, (2016) han cartografiado el permafrost existente en las montañas del Himalaya, distrito de Kulluen el Himachal Pradesh

ENCUADRE 3.4.3. EL PROYECTO SAMCO: “ADAPTACIÓN PARA ENFRENTAR LOS RIESGOS DE MONTAÑA EN UN CONTEXTO DE CAMBIO GLOBAL”

En el proyecto SAMCO se realizó un análisis a escala local (municipio de Cauterets - Francia) de la evolución de deslizamientos debidos al cambio climático. Este tipo de análisis puede considerarse como una estrategia de adaptación. Desde el portal DRIAS (<http://www.drias-climat.fr>) se recuperaron dos escenarios (RCP 4.5 y 8.5., Modelo climático - ALADIN) cuyas proyecciones muestran una tendencia al aumento de eventos extremos de precipitaciones en el corto y largo plazo. Para los puntos más altos, las proyecciones indican un aumento de precipitaciones totales. Para los puntos más bajos, se anticipa un ligero aumento a corto plazo y una pequeña disminución a largo plazo. Para las temperaturas, las proyecciones indican un significativo aumento de temperatura a corto (+1.5 °C) y a largo plazo (+ 4°C), lo que modificará el equilibrio entre nieve y lluvia. Los análisis del riesgo de deslizamiento se han realizado con el software Alice (Baills et al., 2011, Sedán et al., 2013). El modelo integra el análisis de la estabilidad de taludes en 2D y también considera la fluctuación diaria de la capa freática, simulada con el modelo GARDENIA (Nicolle et al., 2014). Para el escenario RCP 8.5, un aumento significativo del nivel freático medio se proyecta, especialmente entre 2071 y 2100. La Figura 3.4. muestra que se espera un aumento del contenido de agua del suelo, que induce una reducción del Factor de seguridad (FS) en gran parte de la zona estudiada (aunque no sea una señal uniforme en la zona), en particular con el RCP 8.5.

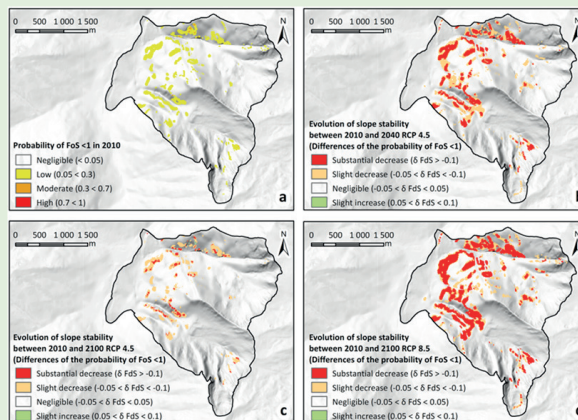


Figura 3.4.2. Evolución de la propensión a deslizamientos considerando un deslizamiento rotacional, de una longitud de 25 m y una profundidad entre 1 y 3 m, de acuerdo al cambio climático con dos escenarios diferentes: a) probabilidad media de un Factor de Seguridad (FS) ⁷² < 1 durante el periodo 1981-2010; b) diferencias de la probabilidad de FS < 1 entre 1981-2010 y 2040 con escenarios RCP 4.5; c) diferencias en la probabilidad de FS < 1 entre 1981-2010 y 2100 con escenarios RCP 4.5; d) diferencias de la probabilidad de FS < 1 entre 1981-2010 y 2100 con Escenarios RCP 8.5. Fuente: Proyecto SAMCO, 2018.

y demostrado que el área cubierta por el permafrost es similar a la de los glaciares en su área de estudio y que, por lo tanto, los riesgos asociados con el cambio climático para este tipo de formación deben ser estudiados. La descongelación del permafrost induce un riesgo de desestabilización vinculado a la subsidencia del suelo. Esta última es provocada por por la pérdida del volumen ocupado por el hielo, así como por la ruptura del equilibrio mecánico que controla el proceso de deslizamientos o desprendimientos de rocas (en el caso del derretimiento de los glaciares de roca), incluso a bajo gradiente (Gruber et al., 2017). Este tipo de riesgo debe ser tomado en serio en el

Himalaya pero también es importante estudiarlo en las montañas europeas, debido al desarrollo de las actividades recreativas y deportivas en esas áreas (Kääb et al., (2005).y Boeckli et al., (2012)).La mayoría de los estudios sobre este tipo de riesgos en montañas de Europa se refieren a los Alpes. Ravanel y Delile (2011), seguidos por Krautblatter et al., (2012) han registrado una serie de eventos donde la caída de bloques está potencialmente vinculada a la descongelación o degradación del permafrost. Bodin et al., (2016) estudiaron la degradación de un glaciar de roca y el desencadenamiento de flujos de lava torrencial asociados. Keiler y Fuchs (2016) presentan un análisis

(72) El factor de seguridad (FS) es un índice proporcionado por una simulación mecánica y utilizado para la caracterización de la estabilidad de taludes. Para FS < 1, la pendiente es considerada inestable; para 1 < FS < 1.2, la pendiente se considera potencialmente inestable y para FS > 1.2, la pendiente se considera estable.

retrospectivo sobre el vínculo entre derretimiento del permafrost y exposición al riesgo en los Alpes austriacos. Magnin et al., (2017) estudiaron la evolución del estado del permafrost en el macizo del Monte Blanco, desde la Pequeña Edad de Hielo (1300-1850) hasta la actualidad; luego propusieron una proyección para 2100, concluyendo a un aumento en la frecuencia de futuros grandes eventos de desmoronamiento en entornos glaciales.

En los Pirineos, el permafrost es monitoreado en pequeñas extensiones y en zonas de mayor altitud (mayormente más allá de los 2.700 m). Se lo puede observar in situ, pero también indirectamente, a través de indicadores tales como los glaciares de roca (Serrano et al., 2009 y 2010, y González García, 2014). Serrano et al., (2009) han propuesto un mapeo del permafrost que combina las observaciones in situ, la topografía, la radiación solar y la temperatura del aire en el macizo del Pirineo español (Figura .5.3). Este mapeo muestra las áreas (en altitudes siempre por encima de los 2.000 m) donde la formación de permafrost es posible o probable por las condiciones locales, según la orientación de los macizos considerados (menor permafrost en las paredes orientadas al norte, que hacia el sur). En la cara noroeste del monte Vignemale, donde un aumento de eventos de desmoronamiento ha sido observado durante los últimos años, se ha instalado un sistema de seguimiento de la evolución del permafrost para comprender la influencia del clima local en los fenómenos de degradación y descongelación (Rico et al., 2017).

3.4.5 Avalanchas

Las avalanchas varían desde pequeños deslizamientos que apenas afectan a esquiadores, hasta fenómenos catastróficos que ponen en peligro comunidades o circuitos de circulación de montaña (EAWS, 2016). La formación de una avalancha resulta de interacciones complejas entre terreno, manto nivoso y condiciones meteorológicas, que pueden llevar al deslizamiento de nieve seca o húmeda (EEA, 2017a). Según EEA (2017a), *“la actividad de avalancha de nieve seca o húmeda aumentó entre 1952 y 2013, particularmente durante la temporada de mediados de invierno y en alta altitud”*. La mayor parte de los accidentes mortales causados por avalanchas ocurrieron en territorio no controlado (mayormente accidentes recreacionales); se reportan pocos decesos en territorio controlado (urbanizaciones y corredores de transporte) (EEA, 2017a). En los Alpes, los decesos pueden llegar a una media de 100 casos cada invierno. En Cataluña, se reporta una media de 1 a 2 casos mortales desde 1987, evidenciando una tendencia a la baja que puede ser fruto del uso creciente de equipamiento básico de seguridad personal para actividades de montaña (Martin-Vide, 2016). A través de estudios de estudios de dendrogeomorfología para la datación y reconstrucción de avalanchas, se ha demostrado que el invierno de 1995–1996 fue el más extraordinario en términos de ocurrencia de avalanchas de gran magnitud en los Pirineos Orientales (Muntan et al., 2009). Un incremento estadístico de estas

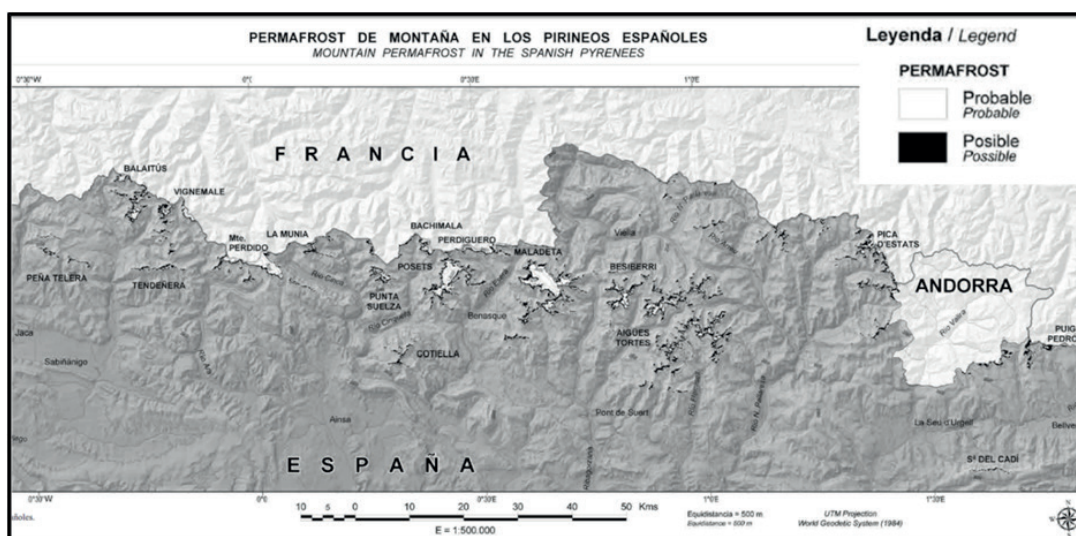


Figura 3.4.3. Presencia, posible y probable, de permafrost en los Pirineos españoles (modificado de Serrano et al., 2009).

últimas fue reportado por García-Sellés *et al.*, (2010) y especialmente de eventos con nieve húmeda (Oller *et al.*, 2015) en la misma región. La evolución futura dependerá de los posibles cambios en las características del manto nivoso y su correlación con avalanchas. Tal como lo reporta EEA (2017a) *“La correlación entre frecuencia y magnitud de las avalanchas y el cambio climático es aún imprecisa. En general, se asume que los cambios posibles en frecuencia de avalanchas y magnitud están correlacionados con cambios en nivinidad, con una probable reducción de los riesgos de avalancha en bajas y medianas altitudes (por causa del incremento de temperaturas en invierno), aunque una mayor frecuencia de fenómenos de precipitación fuerte pueda contrarrestar esta tendencia (PLANALP, 2016)”*. Castebrunet *et al.*, (2014) proyectó un probable aumento de las avalanchas de invierno en los Alpes Occidentales por encima de los 2.500 m, causado por el posible aumento de la frecuencia de fuertes precipitaciones. En el área de esquí de la región francesa de Nouvelle Aquitaine, la persistencia del manto nivoso se podría reducir de 3 a 2 meses a finales del siglo XXI (Le Treut, 2013). Para el mismo horizonte temporal, la frecuencia de fenómenos de fuertes caídas de nieve podría disminuir por debajo de 2.000 m y aumentar por encima de esa altitud, según López-Moreno *et al.*, (2011).

Para fines de planificación de adaptación, las observaciones de avalanchas (tales como series temporales dendrogeomorfológicas, censos poblacionales y aprovechamiento de datos históricos) se pueden usar con modelos estadístico-dinámicos con confianza razonable para la predicción de distancias de recorrido de avalanchas con altos periodos de retorno (Schläppy *et al.*, 2014). Sin embargo, la incertidumbre sobre el cambio climático futuro requiere una gestión activa del riesgo, junto con una combinación de medidas de protección permanentes y temporales (EEA, 2017a).

3.4.6. Diseñar una estrategia de adaptación a los riesgos naturales en el futuro

La capacidad de adaptación caracteriza la capacidad de ajuste de un territorio al cambio climático (que incluye la variabilidad climática y los eventos extremos) con el fin de mitigar los daños potenciales, aprovechar las oportunidades o enfrentarse a las consecuencias. Adaptarse a futuros peligros asociados a eventos naturales, requiere combinar medidas de reducción de los peligros actuales y medidas para afrontar los impactos del

clima sobre su evolución futura. Si bien los documentos de planificación actuales identifican bien los riesgos actuales, pocos de ellos integran la variable del cambio climático para valorar su posible evolución futura.

Algunos proyectos⁷³ están estudiando las interacciones entre los procesos ambientales y sociales en los territorios pirenaicos, en el contexto de transformaciones territoriales y cambio climático. Los Pirineos han sufrido importantes transformaciones territoriales (disminución de la demografía y de las actividades agropastorales, desarrollo del turismo). Esto plantea la cuestión de la forma en que las comunidades locales perciben estos cambios y la relación que establecen entre peligros naturales y cambio climático. Los resultados preliminares de una encuesta en los valles de Aspe y de Ossau (Béarn, FR), muestran que los cambios ambientales son hechos constatados por la mayoría de los entrevistados (autoridades, habitantes), lo que demuestran utilizando indicadores tales como: acortamiento del periodo de nieve, aumento de las tormentas o episodios de sequía, o incluso la presencia considerada inusual en altura de especies animales y vegetales. Sin embargo, vincular el cambio climático y los riesgos naturales no es tan fácil para los representantes electos entrevistados. De hecho, la mayor parte del tiempo tienden a hacerse eco de las incertidumbres científicas. Así, la cuestión de la adaptación sigue siendo marginal en los planes para la prevención de los riesgos naturales de montaña (PPR), que, además, son a menudo discutidos (incluidos los límites de zonificación y la metodología utilizada) por los asentamientos y los residentes afectados. No obstante, en Andorra, los documentos de planificación toman en cuenta las situaciones extremas, tales como zonificación oficial del riesgo de flujos de desechos, donde se toma como referencia los escenarios más pesimistas de cambio climático (Hürliemann *et al.*, 2006). Los municipios de montaña son a menudo muy poco poblados y tienen escasos recursos, tanto humanos como financieros (con excepción de Andorra). En los Pirineos franceses, los funcionarios electos mencionan que perciben una reducción de la capacidad de asesoramiento y de la experiencia de los servicios del Estado a los municipios, lo que limita su capacidad para afrontar el cambio climático. A nivel nacional, el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático de Francia (MEDDTL, 2011), considera que la política de gestión de riesgos naturales aplicada hasta ahora ofrece un marco apropiado para tener en cuenta su evolución

(73) El programa Cesar - programa de adaptación y cambio ambiental en la región, y el programa en curso RiTTA - Riesgos y Transformaciones Territoriales en Aquitania, han sido financiados por el Consejo Regional de Nueva Aquitania.

futura, a condición de fortalecer ciertos aspectos y anticipar las perturbaciones futuras. Este plan propone 30 medidas de alcance nacional, casi la mitad de las cuales ya han sido aplicadas, según el CGEDD (2015). Sin embargo, este plan no incluye acciones territoriales de adaptación, que son responsabilidad de los planes regionales para el clima, el aire y la energía (SRCAE) y los planes territoriales para el clima y la energía (PCET). En España, el primer plan nacional de adaptación al cambio climático, adoptado en 2006, apuntaba a la elaboración de escenarios climáticos regionales y acciones de difusión de conocimientos sobre las montañas y otros 14 temas. El segundo programa ha continuado este trabajo para el período de 2009-2012, mediante el fortalecimiento de los indicadores y mecanismos de monitoreo. Un tercer programa ha sido aprobado para el período de 2014-2020, con el fin de movilizar a la totalidad de los instrumentos financieros de la Unión Europea.

3.4.7 Conclusiones y recomendaciones

Principales retos

Los conocimientos actuales acerca de la posible influencia del cambio climático sobre los peligros asociados con los principales riesgos naturales que pueden encontrarse en los Pirineos han sido presentados en este capítulo. Estos conocimientos aún están afectados por una incertidumbre considerable, especialmente relacionada con la función decisiva de la evolución futura de la urbanización y de las políticas de turismo, la ocupación y uso de los suelos, la localización y la exposición de las infraestructuras. En general, parecen existir pocas iniciativas a nivel regional o local en relación con los riesgos naturales que incluyan sistemáticamente el concepto de adaptación al cambio climático. Esto podría explicarse, por un lado, por la falta de conocimiento de los fenómenos considerados y, por otra parte, por el hecho de que las medidas de adaptación se encuentran muchas veces integradas dentro de medidas de alcance más general (protección de las poblaciones, producción de alimentos, mantenimiento o fortalecimiento de la actividad económica e industrial en las zonas de montaña) (OPCC, 2013).

Recomendaciones

De manera general, se recomienda enfocar la adaptación a la escala de gestión de los intereses

ENCUADRE 3.4.4. GUÍA DE ACOMPAÑAMIENTO: “EL CLIMA: LOGRAR UN CAMBIO EXITOSO”⁷⁴

Los miembros del Grupo de Reflexión y Acción para la Adaptación a los efectos del Cambio Climático (GRAACC), animado por Rhône-Alpes Energía Ambiental, han publicado un documento que presenta las principales etapas de ejecución de un proyecto territorial de adaptación al cambio climático para las regiones alpestres. Luego de una explicación sintética de los impactos previstos en el marco del estudio MEDCIE (2008), se identifican las principales oportunidades y amenazas para la región Rhône-Alpes, así como las orientaciones para la adaptación aplicadas. Luego, la guía documenta en detalle un enfoque para la construcción de éstas estrategias, incluso llegando a proponer modelos de pliegos de especificaciones para los contratistas que estarían a cargo de la caracterización de la vulnerabilidad del territorio a los cambios climáticos. Por último, se discute la definición de la estrategia de adaptación, recordando los principios básicos y señalando los elementos esenciales para su aplicación.

afectados por el tipo de riesgo natural considerado (OPCC, 2013). A estas escalas (generalmente locales), el enfoque debe incluir la caracterización de la vulnerabilidad actual del territorio (importancia y ubicación de las poblaciones y las infraestructuras expuestas) al riesgo natural considerado y su evolución futura (Fuchs et al., 2017). El proyecto Climadapt proporciona un catálogo de ejemplos⁷⁵ de medidas de adaptación, algunas de las cuales se refieren a eventos extremos y altos niveles de agua e inundaciones, aunque ninguna de ellas se aplique al contexto específico de montaña. La Comisión Europea recomienda someter las medidas adoptadas a un test de “chequeo climático”, para asegurarse que su adecuación a las futuras condiciones climáticas sea satisfactoria. También promueve el concepto de “toma de decisión robusta” (Lempert et al., 2003), que la considera como tal si ofrece buenos resultados, independientemente del posible futuro y de las incertidumbres. Las medidas robustas pueden ser: 1) medidas “sin remordimientos” (que proporcionan beneficios en todos los casos (y a menudo en el corto plazo), 2) medidas con “márgenes de seguridad”, que pueden ser abandonadas o ampliadas sin pérdida de

(74) <http://orecc.auvergnerhonealpes.fr/fr/publications/outils-et-methodes/guide-climat-reussir-le-changement.html>

(75) <http://climate-adapt.eea.europa.eu/knowledge/tools/sat>

la inversión inicial (como por ejemplo la construcción de un dique fácilmente desarmable), 3) medidas “flexibles y reversibles”, como la implementación de sistemas de alerta, que pueden adaptarse en función de las consecuencias de los eventos observados, 4) medidas “blandas” (descritas más abajo), y (5) medidas para “reducir el horizonte de tiempo” (preferir las infraestructuras de corta duración). Esto implica que un plan de adaptación que consiste en una sola medida puede ser menos robusto que un plan que incorpora una diversidad de medidas, aunque este último sea más costoso.

Medidas soft⁷⁶

Las medidas no-estructurales (“soft”) aprovechan prácticas y políticas de información, divulgación y educación, evitando construcciones físicas. El plan PNACC (MEDDTL, 2011) por ejemplo invita a mejorar el conocimiento del impacto del cambio climático sobre los riesgos naturales y, en particular: a llevar a cabo un inventario de las medidas existentes de prevención de inundaciones; a elaborar mapas de riesgos naturales; a crear herramientas de ayuda a la decisión y, al mismo tiempo, a integrar las proyecciones climáticas. También es recomendable sustituir los valores de referencia para el clima de la normativa vigente, o los períodos de retorno para eventos (en la actualidad, basados en 30 años de estadísticas), por valores que representen el contexto del clima futuro, con la ayuda de herramientas de modelación (CGET, 2015). Los sistemas de observación de los diferentes riesgos naturales deben ser mantenidos, ampliados u optimizados para monitorear mejor en altitudes y/o zonas de difícil acceso, que serán más fuertemente afectados por el aumento de la temperatura (entornos peri-nivo-glaciales). Los sistemas de monitoreo también deben permitir obtener datos con mayor resolución temporal y precisión (monitoreo continuo y en tiempo real) y sobre los compartimentos físicos en los que tienen lugar los procesos (por ejemplo: temperatura y humedad en los suelos). Asimismo, el cálculo mediante modelación de valores umbral en los que se basan los sistemas de alerta temprana, en, también debe considerarlas proyecciones climáticas.

Los operadores de estos sistemas de vigilancia y alerta deben sistematizar la recopilación de la experiencia de los eventos registrados, para mejorar los procedimientos en consecuencia. Los territorios deben poder tener acceso a servicios climáticos que proporcionen información detallada y sintética, relevante para su futura situación (CGET, 2015). Por último, la futura distribución de la población y de las infraestructuras en un territorio también debe limitar su exposición a los riesgos naturales. Sobre las actividades de esparcimiento en las montañas: para una mejor prevención hacia las poblaciones que las practican, parece necesario, en lugares turísticos, el exponer mapas para mostrar información sobre el estado actual y futuro de los peligros (lluvias extremas, inundaciones, deslizamientos, aludes y avalanchas, desprendimientos de rocas, y los fenómenos relacionados con la degradación de la criósfera). También sería útil compilar localmente inventarios de estructuras esenciales para el uso público que presentan una vulnerabilidad. Esto implica el desarrollo de una cultura del riesgo, y de hacerla extensiva a todos los niveles de gestión: colectividades, barrios y zonas de actividades comerciales e industriales, empresas y fuentes de empleo, entornos educativos (ONERC, 2007). Ésta cultura del riesgo debe integrar las incertidumbres sobre la evolución de futuros eventos, prepararse para ellos, si es posible, mediante la aplicación de enfoques de toma de decisión robustos.

Medidas verdes⁷⁷

Las medidas verdes (basadas en soluciones naturales, NBSs) se definen como las soluciones que son “inspiradas y mantenidas por la naturaleza, rentables, que proporcionan beneficios a la vez ambientales, sociales y económicos, y contribuyen a fortalecer la resiliencia” (UE, 2015). En la actualidad, pocas medidas de este tipo se aplican a los riesgos naturales, y a las regiones de montaña. Entre ellas, se puede utilizar los bosques que estabilizan las formaciones superficiales generadoras de inundaciones torrenciales y deslizamientos de tierra (ejemplo de la reducción de fenómenos torrenciales y eventos de flujo de

(76) Las medidas Soft o medidas no estructurales para reducir o paliar los efectos negativos del cambio climático. Esta categoría de medida está típicamente representada por los estudios de investigación enfocados a cubrir lagunas de conocimiento o para enriquecer las bases de conocimiento sobre el cambio climático, sus impactos y los sectores más vulnerables. También entra en esta categoría el desarrollo de metodologías y sistemas específicos para reducir riesgos derivados del cambio climático (ej. Desarrollo de un early warning System transfronterizo para la gestión de las olas de calor en el Macizo).

(77) Las medidas verdes o basadas en los servicios ecosistémicos: esta tipología de medida incluye todas las medidas, buenas prácticas, estudios o iniciativas que tengan como principio el uso de los servicios ecosistémicos procurados por los distintos recursos naturales para paliar los efectos negativos del cambio climático (ej. prácticas silviculturales conservativas para incrementar la capacidad de los bosques del Pirineo para reducir los riesgos hidrogeológicos).

deshechos mediante la forestación/reforestación en los Apeninos centrales de Italia (Gariano y Guzzetti (2016)). En términos de control de inundaciones, el PNUE (2014) recomienda aumentar la capacidad de almacenamiento del agua (cuencas y zonas urbanas), aumentar la capacidad de caudal de los canales (reducción de la velocidad de propagación de las avenidas), ampliar los tampones ribereños, usar la forestación/reforestación y conservar los bosques, reconectar los ríos a las llanuras aluviales, restaurar /conservar y crear humedales, establecer desvíos de inundación. La AEE (2017a) también recomienda favorecer el desbordamiento en ciertas secciones de los ríos, con el objetivo de reducir la altura de inundación total o de alejar los diques del cauce del río. Para el control de la escorrentía pluvial urbana, el PNUE también recomienda: tejados verdes, espacios verdes (permitiendo bioretention e infiltración), recolección de agua y pavimentos permeables (medidas “grises”, que deben sin embargo favorecer a los ecosistemas acuáticos). El portal de la Dirección General de Medio Ambiente de la UE⁷⁸ presenta los beneficios de algunas de estas medidas. Para terminar, el proyecto PHUSICOS, un proyecto europeo que se inició en el 2018, recopilará, desarrollará y experimentará NBSs, para reducir riesgos hidrometeorológicos en zonas de montaña. Este proyecto contribuirá a proponer medidas verdes adecuadas al contexto pirenaico, ya que algunos de sus casos de estudio están localizados en los Pirineos franceses y españoles.

Medidas grises⁷⁹

Las soluciones infraestructurales “grises” de protección frente a los riesgos naturales, son atractivas ya que pueden brindar impactos inmediatos y de alta visibilidad. Sin embargo, también presentan inconvenientes, ya que su construcción, operación, mantenimiento y reemplazo puede resultar costoso. Por otro lado pueden desviar y ampliar el riesgo natural hacia otras ubicaciones que no estén preparadas para afrontarlo, o pueden conducir a la degradación de los ecosistemas (por ejemplo, desconectar los ríos de las planicies) (PNUE, 2014). Las medidas estructurales implican la construcción de defensas físicas (por ejemplo, muros, pilotes, drenajes, cuencas de retención), que se han diseñado teniendo en cuenta el tipo y la magnitud del peligro considerado y un período de retorno de referencia para el evento anticipado. Las infraestructuras defensivas existentes,

ya sean simples (por ejemplo, un muro de retención, un embalse, un drenaje) o múltiples (por ejemplo, un sistema de barreras/diques de retención o un conjunto de drenajes en una pendiente, un conjunto de diques de contención en una cuenca de captación) pueden requerir modificaciones para adecuarse a las condiciones climáticas futuras proyectadas (Gariano y Guzzetti (2016)). Puede ser necesario, por ejemplo, elevar los diques, ampliar las superficies de expansión de avenidas, o crear grandes estanques de retención o, incluso, adaptar los sistemas de depuración de aguas residuales de los municipios grandes para los niveles más altos de precipitación. También pueden realizarse medidas intermedias, como la limpieza de alcantarillas y cunetas. Normalmente, el período de retorno, o la frecuencia de ocurrencia esperada para el evento considerado, se determina suponiendo una serie de tiempo estacionaria de eventos (tal como un registro de deslizamientos de tierra o de inundaciones) o de desencadenadores (tal como un registro de eventos de precipitación o deshielo). En el marco de un clima en evolución, la hipótesis estacionaria puede no ser válida. De esta manera, Gariano y Guzzetti (2016) recomiendan la adopción de un enfoque pragmático para resolver problemas, basándose en la experiencia (registros históricos), las informaciones existentes y nuevas (monitoreo) y los modernos medios de cálculo y de modelización que incluyan la incertidumbre inherente a los futuros escenarios climáticos. Por último, también se puede considerar el uso de incentivos económicos para por ejemplo limitar la implantación de infraestructuras y poblaciones en zonas de riesgo - por ejemplo, vinculando las primas de seguro con la exposición al riesgo. Un informe de la EEA del 2017 (EEAb, 2017) ofrece varios ejemplos de financiación para acciones basadas en la naturaleza o en los ecosistemas y otras acciones de adaptación, incluyendo fuentes de financiamiento convencionales e innovadoras tales como los bonos verdes y el crowdfunding.

(78) <http://nwrn.eu/measures-catalogue>

(79) Las medidas grises o infraestructurales basan su acción paliativa en la construcción o implantación de elementos infraestructurales concretos (ej. construcción de diques en las zonas habitadas de alto riesgo de inundaciones torrenciales).

IDEAS CLAVE

En un horizonte de tiempo difícil de determinar con precisión (entre 2030 y el final del siglo), el territorio pirenaico podría tener que adaptarse a las siguientes situaciones:

- Aumento de temperaturas máximas y mínimas, olas de calor y episodios de sequía, que serán potencialmente más largos y más intensos;
- Aumento de la ocurrencia de lluvias intensas y de la intensidad de los episodios de granizo;
- Aumento del riesgo asociado a las inundaciones, aunque la señal todavía no se ha definido con certeza y que depende del probable aumento de la vulnerabilidad de las poblaciones y las infraestructuras, especialmente en las zonas turísticas costeras y en los cursos de agua contiguos;
- Posible debilitación de la estabilidad de pendientes, producto de la evolución futura de las precipitaciones y de las temperaturas, asociadas al deshielo o degradación acelerada del permafrost;
- Posible disminución de la ocurrencia de las avalanchas en alturas bajas y medias, a causa del aumento de la temperatura;

En términos de adaptación a estas situaciones futuras, se recomienda incluir en los documentos de planificación y/o de adaptación por producirse los conocimientos existentes sobre los impactos del cambio climático sobre los riesgos naturales y una estimación de la vulnerabilidad del territorio a dichos riesgos. En la medida de lo posible, también se recomienda someter las acciones que se planifiquen a un chequeo climático, que asegure su adecuación al contexto climático futuro. Los planes de adaptación deben concebirse con el objetivo de permitir una toma de decisión robusta, incorporando y/o combinando diferentes tipos de medidas, soft, verdes y grises, en función del contexto geográfico y de las incertidumbres asociadas al cambio climático sobre el territorio considerado.

Bibliografía

1 Clima y Variabilidad Climática en los Pirineos

1.1 El clima del periodo glacial y la deglaciación

- Bartolomé, M., Moreno, A., Sancho, C., Stoll, H.M., Cacho, I., Spötl, C., Belmonte, A., Edwards, R.L., Cheng, H., Hellstrom, J.C., 2015. Hydrological change in Southern Europe responding to increasing North Atlantic overturning during Greenland Stadial 1. PNAS. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1503990112>.
- Cisneros, M., Cacho, I., Frigola, J., Canals, M., Masqué, P., Martrat, B., Casado, M., Grimalt, J.O., Pena, L.D., Margaritelli, G., Lirer, F., 2016. Sea surface temperature variability in the central-western Mediterranean Sea during the last 2700 years: a multi-proxy and multi-record approach. *Clim. Past* 12, 849–869.
- CLIVAR Report: Pérez, Fiz F.; Boscolo, Roberta (eds.). 2010. Climate in Spain: past, present and future. Regional climate change assessment report. [Madrid] Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN), 83 pp.
- Corella, J.P., Valero-Garcés, B.L., Vicente-Serrano, S.M., Brauer, A., Benito, G., 2016. Three millennia of heavy rainfalls in Western Mediterranean: frequency, seasonality and atmospheric drivers. *Scientific Reports* 6. 38206; doi: 10.1038/srep38206
- Delmas, M., Calvet, M., Gunnell, Y., Braucher, R., Bourlès, D. 2011. Palaeogeography and ¹⁰Be exposure age chronology of Middle and Late Pleistocene glacier systems in the northern Pyrenees: implications for reconstructing regional palaeoclimates. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 305, 109-122. Doi: 10.1016/j.palaeo.2011.02.025.
- García-Ruiz, J.M., Martí-Bono, C., Peña-Monné, J.L., Sancho, C., Rhodes, E.J., Valero-Garcés, B., González-Samperiz, P., Moreno, A. 2013. Glacial and fluvial deposits in the Aragón Valley, Central-Western Pyrenees: Chronology of the Pyrenean late Pleistocene glaciers- *Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography* 95, 15-32. Doi: 10.1111/j.1468-0459.2012.00478.x.
- Giral, S., Moreno, A., Cacho, I., Valero-Garcés, B.L. 2017. A comprehensive overview of the last 2,000 years Iberian Peninsula climate history, CLIVAR Exchanges No. 73, 5-10.
- González-Sampériz, P., Valero-Garcés, B.L., Moreno, A., Jalut, G., García-Ruiz, J.M., Martí-Bono, C., Delgado-Huertas, A., Navas, A., Otto, T., Dedoubat, J.J. 2006. Climate variability in the Spanish Pyrenees during the last 30,000 yr revealed by the El Portalet sequence. *Quaternary Research* 66, 38-52. Doi : 10.1016/j.qres.2006.02.004.
- González-Sampériz, P.; Aranbarri, J.; Pérez-Sanz, A.; Gil-Romera, G.; Moreno, A.; Leunda, M.; Sevilla-Callejo, M.; Corella, J.P.; Morellón, M.; Oliva, B.; Valero-Garcés, B. 2017. Environmental and climate change in the southern Central Pyrenees since the Last Glacial Maximum: A view from the lake records. 2017. *Catena* 149, 668 – 688.
- Leunda, M., González-Sampériz, P., Gil-Romera, G., Aranbarri, J., Moreno, A., Oliva-Urcia, B., Sevilla-Callejo, M., y Valero-Garcés, B. 2017. The Late-Glacial and Holocene Marboré Lake sequence (2612 m a.s.l., Central Pyrenees, Spain): Testing high altitude sites sensitivity to millennial scale vegetation and climate variability *Global and Planetary Change* 157: 214-231
- Lewis, C.J., McDonald, E.V., Sancho, C., Peña, J.L., Rhodes, E.J. 2009. Climatic implications of correlated Upper Pleistocene glacial and fluvial deposits on the Cinca and Gállego Rivers (NE Spain) based on OSL dating and soil stratigraphy. *Global and Planetary Change* 61, 300-312. Doi: 10.1016/j.gloplacha.2009.01.001.
- López Moreno, J.I. (2000). Los glaciares del alto valle del Gállego (Pirineo Central) desde la Pequeña Edad del Hielo. Implicaciones en la evolución de la temperatura. *Geoforma Ediciones, Logroño*, 77 pp.
- Millet L., D. Rius, D. Galop, O. Heiri, S.J. Brooks 2012. Chironomid-based reconstruction of Lateglacial summer temperatures from the Ech palaeolake record (French western Pyrenees). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 315–316: 86–99
- Morellón, M., Pérez-Sanz, A., Corella, J.P., Büntgen, U., Catalán, J., González-Sampériz, P., González-Trueba, J.J., López-Sáez, J.A., Moreno, A., Pla-Rabes, S., Saz-Sánchez, M.Á., Scussolini, P., Serrano, E., Steinhilber, F., Stefanova, V., Vegas-Vilarrúbia, T., Valero-Garcés, B., 2012. A multi-proxy perspective on millennium-long climate variability in the Southern Pyrenees. *Clim. Past* 8, 683–700.
- Moreno, A., Pérez, A., Frigola, J., Nieto-Moreno, V., Rodrigo-Gámiz, M., Martrat, B., González-Sampériz, P., Morellón, M., Martínez-Puertas, C., Corella, J.P., Belmonte, Á., Sancho, C., Cacho, I., Herrera, G., Canals, M., Grimalt, J.O., Jiménez-Espejo, F., Martínez-Ruiz, F., Vegas-Vilarrúbia, T., Valero-Garcés, B.L., 2012. The Medieval Climate Anomaly in the Iberian Peninsula reconstructed from marine and lake records. *Quaternary Science Reviews* 43, 16–32.
- Oliva, M., J. Ruiz-Fernández, M. Barriendos, G. Benito, J.M. Cuadrat, F. Domínguez-Castro, J.M. García-Ruiz, S. Giral, A. Gómez-Ortiz, A. Hernández, O. López-Costas, J.I. López-Moreno, J.A. López-Sáez, A. Martínez-Cortizas, A. Moreno, M. Prohom, M.A. Saz, E. Serrano, E. Tejedor, R. Trigo, B. Valero-Garcés, S.M. Vicente-Serrano. 2018. The Little Ice Age in Iberian mountains. *Earth Science Reviews* 177 (2018) 175–208.
- Palacios, D., García-Ruiz, J.M., Andrés, N., Schimmelpfennig, I., Campos, N., Leanni, L., ASTER Team 2017. Deglaciation in

- the central Pyrenees during the Pleistocene-Holocene transition: Timing and geomorphological significance. *Quaternary Science Reviews* 162, 111-127. Doi: 10.1016/j.quascirev.2017.03.007.
- Pallàs, R., Rodés, A., Braucher, R., Bourlès, D., Delmas, M., Calvet, M., Gunnell, Y. 2010. Small, isolated glacial catchments as priority targets for cosmogenic surface exposure dating of Pleistocene climate fluctuations, southeastern Pyrenees. *Geology* 38, 891-894. Doi: 10.1130/G31164.1.
 - Pla, S., Catalan, J., 2011. Deciphering chrysophyte responses to climate seasonality. *J Paleolimnol* 46, 139-150
 - Rius, D., Vannièrre, B. and Galop, D. 2012. Holocene history of fire, vegetation and land use from the central Pyrenees (France). *Quaternary Research* 77: 54-64.

1.2 El clima actual

1.3 Proyecciones de cambio climático en los Pirineos

- Balseinte, R. 1966. *Climats montagnards et stations climatiques d'altitude en France*. Ministère de l'Éducation Nationale et CNRS. Paris
- Bartolomé, M., Moreno, A., Sancho, C., Stoll, H.M., Cacho, I., Spötl, C., Belmonte, A., Edwards, R.L., Cheng, H., Hellstrom, J.C., 2015. Hydrological change in Southern Europe responding to increasing North Atlantic overturning during Greenland Stadial 1. *PNAS*. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1503990112>.
- Böhm, R., Auer, I., Schöner, W., Ganekind, M., Gruber, C., Jurkovic, C., Orlik, A. and Ungersböck, M. 2009. Eine neue Webseite mit instrumentellen Qualitäts Klimadaten für den Grossraum Alpen zurück bis 1760. *Wiener Mitteilungen Band 216: Hochwässer: Bmessung, Risikoanalyse und Vorhersage*.
- Bordonau, J.; Serrat, D. y Vilaplana, J.M. (1992): Las fases glaciares cuaternarias en los Pirineos. In: Cearreta, A. y Ugarte, F.M. (eds.): *The Late Quaternary in the Western Pyrenean Region*. Servicio Editorial Universidad del País Vasco, Bilbao, pp. 303-312.
- Brunet, M., Casado M. J., Castro, M., Galán, M. P., López, J. A., Martín, J. M., Torres, L. 2008. Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España. Ministerio de Medio Ambiente Medio Rural y Marino. 158 pp.
- Brunet, M., Jones, P., Sigró, J., Saladié, O., Aguilar, E., Moberg, A., Della- Marta, P.M., Lister, D., Whalther, A. and López, D. 2007. Temporal and spatial temperature variability and change over Spain during 1850-2005. *Journal of Geophysical Research*, 112: D12117.
- Bücher, A. and Dessens J. 1991. Secular trend of surface temperature at an elevated observatory in the Pyrenees. *J. Clim.* 4: 859-868.
- Buisan, S.; Saz, M.A.; López-Moreno, J.I., 2015. Spatial and temporal variability of winter snow and precipitation days in the western and central Spanish Pyrenees. *International Journal of Climatology* 35: 259-274.
- Cisneros, M., Cacho, I., Frigola, J., Canals, M., Masqué, P., Martrat, B., Casado, M., Grimalt, J.O., Pena, L.D., Margaritelli, G., Lirer, F., 2016. Sea surface temperature variability in the central-western Mediterranean Sea during the last 2700 years: a multi-proxy and multi-record approach. *Clim. Past* 12, 849-869. doi:10.5194/cp-12-849-2016
- CLIVAR Report: Pérez, F.; Boscolo, Roberta (eds.). 2010. *Climate in Spain: past, present and future*. Regional climate change assessment report. [Madrid] Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN), 83 pp.
- Copons, R., Bordonau, J. 1997: El registro glaciar correspondiente a la Pequeña Edad del Hielo en la Península Ibérica. En: Ibañez, J.J., Valero Garcés, B.L. i Machado, C. (Eds.): *El paisaje mediterráneo a través del espacio y del tiempo. Implicaciones en la desertificación*. Geoforma ediciones, Logroño, p. 295-310.
- Corella, J.P., Valero-Garcés, B.L., Vicente-Serrano, S.M., Brauer, A., Benito, G., 2016. Three millennia of heavy rainfalls in Western Mediterranean: frequency, seasonality and atmospheric drivers. *Scientific Reports* 6. doi:10.1038/srep38206
- Creus, J. 1983. *El clima del alto Aragón occidental*. Instituto de Estudios Pirenaicos, 109. 421 pp.
- Cuadrat, J.M., Serrano, R., Saz, M.A., Tejedor, E., Prohom, M., Cunillera, J., Esteban, P., Soubeyroux, J.M., Deaux, N. 2013. Creación de una base de datos homogeneizada de temperaturas para los Pirineos (1950-2010). *Geographicalia*, 64: 63-74.
- Deaux, A.; Soubeyroux, J.M.; Cuadrat, J.M.; Cunillera, J.; Prohom, M. 2014. Homogénéisation transfrontalière des températures sur le massif des Pyrénées. *Rev. Climatologie*, vol 24 pp: 67-78.
- Delmas, M., Calvet, M., Gunnell, Y., Braucher, R., Bourlès, D. 2011. Palaeogeography and ¹⁰Be exposure age chronology of Middle and Late Pleistocene glacier systems in the northern Pyrenees: implications for reconstructing regional palaeoclimates. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 305, 109-122. Doi: 10.1016/j.palaeo.2011.02.025.
- Durand, Y., Giraud, G., Goetz, D., Malou, M. and Payen, V. 2012. Modeled snow cover in Pyrenees mountains and cross-comparisons between remote-sensed and land-based observation data. *Proceedings, 2012 International Snow Science Workshop, Anchorage*.
- El-Kenawy, A., López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., 2011. Recent changes in daily temperature extremes in Northeastern Spain: 1960-2006. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11: 1-21.

- Espejo, F., Ferraz, J. y Palomo, M. 2008. Tendencias recientes en las series de temperatura del Pirineo Central y Occidental. IV Congreso Internacional de la AEC, serie A (6): 99-108.
- Esteban, P., Jones P.D., Martín-Vide, J. and Mases, M. 2005. Atmospheric circulation patterns related to heavy snowfall days in Andorra. Pyrenees. *Int J Climatol* 25:319–329.
- Esteban, P., Prohom, M. y Aguilar, E. 2012. Tendencias recientes e índices de cambio climático de la temperatura y la precipitación en Andorra. Pirineos (1935–2008). *Pirineos* 167: 87–106.
- García-Ruiz J.M., López-Moreno, J.I. Serrano-Vicente S., Beguería, S. and Lasanta, T., 2011. Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth Science Reviews* 105 (3-4): 121-139.
- García-Ruiz, J.M., Martí-Bono, C., Peña-Monné, J.L., Sancho, C., Rhodes, E.J., Valero-Garcés, B., González-Samperiz, P., Moreno, A. 2013. Glacial and fluvial deposits in the Aragón Valley, Central-Western Pyrenees: Chronology of the Pyrenean late Pleistocene glaciers- *Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography* 95, 15-32. Doi: 10.1111/j.1468-0459.2012.00478.x.
- García-Ruiz, J.M.; Palacios, D.; González-Sampérez, P.; de Andrés, N.; Moreno, A.; Valero-Garcés, B.; Gómez-Villar, A. 2016. Mountain glacier evolution in the Iberian Peninsula during the Younger Dryas. *Quaternary Science Reviews*; vol: 138: 16 – 30
- Gascoin, S., Hagolle, O., Huc, M., Jarla, L., Dejoux, J.F., Szczypta, C., Marti, R. and Sánchez, R. 2015. A snow cover climatology for the Pyrenees from MODIS snow products. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19: 2337–2351.
- Gilaberte, M., López-Martín, F., Pino-Otín, M. R., and López-Moreno, J. I. 2014. Impacts of climate change on ski industry. *Environmental Science and Policy*, 44: 51-61.
- Giralt, S., Moreno, A., Cacho, I., Valero-Garcés, B.L. 2017. A comprehensive overview of the last 2,000 years Iberian Peninsula climate history, *CLIVAR Exchanges* No. 73, 5-10.
- González-Sampérez, P., Valero-Garcés, B.L., Moreno, A., Jalut, G., García-Ruiz, J.M., Martí-Bono, C., Delgado-Huertas, A., Navas, A., Otto, T., Dedoubat, J.J. 2006. Climate variability in the Spanish Pyrenees during the last 30,000 yr revealed by the El Portalet sequence. *Quaternary Research* 66, 38-52. Doi : 10.1016/j.qres.2006.02.004.
- González-Sampérez, P.; Aranbarri, J.; Pérez-Sanz, A.; Gil-Romera, G.; Moreno, A.; Leunda, M.; Sevilla-Callejo, M.; Corella, J.P.; Morellón, M.; Oliva, B.; Valero-Garcés, B. 2017. Environmental and climate change in the southern Central Pyrenees since the Last Glacial Maximum: A view from the lake records. 2017. *Catena* 149, 668 – 688.
- Gottardi F. 2009. Estimation statistique et réanalyse des précipitations en montagne. Utilisation d'ébauches par types de temps et assimilation de données d'enneigement. Application aux grands massifs montagneux français. Thèse de doctorat, INPG, Grenoble, 261 p.
- Gutiérrez, J.M., Maraun, D., Widman, M., Huth, R., Hertig, E., Benestad, Pagé, C. 2017. An intercomparison of a large ensemble of statistical downscaling methods over Europe: Results from the VALUE perfect predictor cross-validation experiment. *Int. J. Climatol.* (en prensa).
- IPCC: Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M., Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Leunda, M. González-Sampérez, P., Gil-Romera, G. Aranbarri J., Moreno, A., Oliva-Urcia, B., Sevilla-Callejo M., y Valero-Garcés, B. 2017. The Late-Glacial and Holocene Marboré Lake sequence (2612 m a.s.l., Central Pyrenees, Spain): Testing high altitude sites sensitivity to millennial scale vegetation and climate variability. *Global and Planetary Change* 157: 214-231
- Lewis, C.J., McDonald, E.V., Sancho, C., Peña, J.L., Rhodes, E.J. 2009. Climatic implications of correlated Upper Pleistocene glacial and fluvial deposits on the Cinca and Gállego Rivers (NE Spain) based on OSL dating and soil stratigraphy. *Global and Planetary Change* 61, 300-312. Doi: 10.1016/j.gloplacha.2009.01.001.
- López Moreno, J.I. 2000. Los glaciares del alto valle del Gállego (Pirineo Central) desde la Pequeña Edad del Hielo. Implicaciones en la evolución de la temperatura. *Geoforma Ediciones, Logroño*, 77 pp.
- López Moreno, J.I., Goyette, S. and Beniston, M. 2008. Climate change prediction over complex areas: spatial variability of uncertainties and prediction over the Pyrenees from a set of regional climate models. *Int. J. Climatol.* 28 (11): 1535–1550.
- López Moreno, J.I., Goyette, S., Vicente Serrano, S. and Beniston, M. 2011. Effects of climate change on the intensity and frequency of heavy snowfall events in the Pyrenees. *Climatic Change*, 105 (3-4): 489-508.
- López-Moreno, J.I. 2005. Recent variations of snowpack depth in the Central Spanish Pyrenees. *Artic, Antarctic, and Alpine Research*, 37 (2): 253-260.
- López-Moreno, J.I. and Serrano-Vicente, S.M. 2006. Atmospheric circulation influence on the interannual variability of snowpack in the Spanish Pyrenees during the second half of the twentieth century. *Nordic Hydrology* 38 (1):38-44.
- López-Moreno, J.I. and Vicente-Serrano, S.M. 2007. Atmospheric circulation influence on the interannual variability of snowpack in the Spanish Pyrenees during the second half of the twentieth century. *Nord. Hydrol.* 38 (1): 38–44.
- López-Moreno, J.I., Goyete, S., Beniston, M. 2009. Impact of climate change on snowpack in the Pyrenees: Horizontal spatial variability and vertical gradients. *Journal of Hydrology* 374 (3-4), 384-396.

- López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano S.M., Morán-Tejeda E., Lorenzo J., Kenawy, A. and Beniston, M. 2011. NAO effects on combined temperature and precipitation winter modes in the Mediterranean mountains: Observed relationships and projections for the 21st century. *Global and Planetary Change* 77: 72-66.
- Maris, M., Giraud, G., Durand, Y., Navarre, J. P. and Mérindol, L., 2009. Results of 50 years of climate reanalyses in the French Pyrenees (1958-2008) using the SAFRAN and CROCUS models. Davos: International Snow Science Workshop, Proceedings.
- Mestre, O., Domonkos, P., Picard, F., Auer, I., Robin, S., Lebarbier, E., Böhm, R., Aguilar, E., Guijarro, J., Vertachnik, G., Klancar, M., Gubuisson, B. and Stepanek, P. 2013. HOMER: a homogenization software – methods and applications. *Quart. Jour. of the Hungarian Meteorological Service* 117: 47-67.
- Millet L., D. Rius, D. Galop, O. Heiri, S.J. Brooks 2012. Chironomid-based reconstruction of Lateglacial summer temperatures from the Ech palaeolake record (French western Pyrenees). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 315–316: 86–99
- Miquel C., 2012. Étude préliminaire sur les changements climatiques dans le massif des Pyrénées. Caractérisation et effets prévisibles sur la ressource en eau. Mémoire présenté pour l'obtention du titre d'Ingénieur, Polytech' Montpellier. Université de Montpellier II, 152 p.
- Morellón, M., Pérez-Sanz, A., Corella, J.P., Büntgen, U., Catalán, J., González-Sampériz, P., González-Trueba, J.J., López-Sáez, J.A., Moreno, A., Pla-Rabes, S., Saz-Sánchez, M.Á., Scussolini, P., Serrano, E., Steinhilber, F., Stefanova, V., Vegas-Vilarrúbia, T., Valero-Garcés, B., 2012. A multi-proxy perspective on millennium-long climate variability in the Southern Pyrenees. *Clim. Past* 8, 683–700. doi:10.5194/cp-8-683-2012
- Moreno, A., Pérez, A., Frigola, J., Nieto-Moreno, V., Rodrigo-Gámiz, M., Martrat, B., González-Sampériz, P., Morellón, M., Martín-Puertas, C., Corella, J.P., Belmonte, Á., Sancho, C., Cacho, I., Herrera, G., Canals, M., Grimalt, J.O., Jiménez-Espejo, F., Martínez-Ruiz, F., Vegas-Vilarrúbia, T., Valero-Garcés, B.L., 2012. The Medieval Climate Anomaly in the Iberian Peninsula reconstructed from marine and lake records. *Quaternary Science Reviews* 43, 16–32.
- Oliva, M., J. Ruiz-Fernández, M. Barriendos, G. Benito, J.M. Cuadrat, F. Domínguez-Castro, J.M. García-Ruiz, S. Giral, A. Gómez-Ortiz, A. Hernández, O. López-Costas, J.I. López-Moreno, J.A. López-Sáez, A. Martínez-Cortizas, A. Moreno, M. Prohom, M.A. Saz, E. Serrano, E. Tejedor, R. Trigo, B. Valero-Garcés, S.M. Vicente-Serrano. 2018. The Little Ice Age in Iberian mountains. *Earth-Science Reviews* 177 (2018) 175–208.
- Palacios, D., García-Ruiz, J.M., Andrés, N., Schimmelpfennig, I., Campos, N., Leanni, L., ASTER Team 2017. Deglaciation in the central Pyrenees during the Pleistocene-Holocene transition: Timing and geomorphological significance. *Quaternary Science Reviews* 162, 111-127. Doi: 10.1016/j.quascirev.2017.03.007.
- Pallàs, R., Rodés, A., Braucher, R., Bourlès, D., Delmas, M., Calvet, M., Gunnell, Y. 2010. Small, isolated glacial catchments as priority targets for cosmogenic surface exposure dating of Pleistocene climate fluctuations, southeastern Pyrenees. *Geology* 38, 891-894. Doi: 20.1130/G31164.1.
- Peral, C., Navascués, B. y Ramos, P. 2017. Serie de precipitación diaria en rejilla con fines climáticos. Nota técnica de AEMET, nº 24. http://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/NT_24_AEMET/NT_24_AEMET.pdf.
- Pérez-Zanón, N., Sigró, J. and Ashcroft, L. 2017. Temperature and precipitation regional climate series over the central Pyrenees during 1910–2013. *Int J Climatol* 37:1922-1937.
- Pla, S., Catalan, J., 2011. Deciphering chrysophyte responses to climate seasonality. *J Paleolimnol* 46, 139. doi:10.1007/s10933-011-9529-6
- Pons, M., López-Moreno, J.I., Rosas-Casals, M. and Comas, J. 2015. The vulnerability of Pyrenean ski resorts to climate-induced changes in the snowpack. *Climatic change*, 131 (4): 591-605.
- Pons, M., Johnson, A., Rosas-Casals, M., Sureda, B. and Jover, E. 2012. Modeling climate change effects on winter ski tourism in Andorra. *Clim. Res.* 54(3): 197–207.
- Renssen H, Seppä H, Crosta X, et al. (2012) Global characterization of the Holocene Thermal Maximum. *Quat Sci Rev* 48:7–19. doi: 10.1016/j.quascirev.2012.05.022.
- Rius, D., Vannièrre, B. and Galop, D. 2012. Holocene history of fire, vegetation and land use from the central Pyrenees (France). *Quaternary Research* 77: 54-64.
- Soubeyrou J.-M., Jourdain S., Grimal D., Espejo F., Esteban P., Merz T., 2011. Approche transfrontalière pour l'inventaire et la valorisation des données climatologiques sur le Massif des Pyrénées. Colloque SHF « Eaux en montagne », Lyon, 7 p.
- Soubeyrou, J.M., Jourdain S., Grimal, D., Espejo, F., Esteban, P. et Merz T. 2011. Approche transfrontalière pour l'inventaire et la valorisation des données climatologiques sur le Massif des Pyrénées. Colloque SHF « Eaux en montagne », Lyon, 7 p.
- Spagnoli, B., Planton, S., Mestre, O., Déqué, M. and Moisselin, J. M., 2002. Detecting climate change at a regional scale: the case of France. *Geophys. Res. Lett.*, 29-10: 91-94.
- Verfaillie et al., 2017. The method ADAMONT v1.0 for statistical adjustment of climate projections applicable to energy balance land surface models, *GMD*, 10, 4257-4283. doi : 10.5194/gmd-10-4257-2017.
- Verfaillie, D., Lafaysse, M., Déqué, M., Eckert, N., Lejeune, Y. y Morin, S., 2018. Multi-components ensembles of future

meteorological and natural snow conditions in the Northern French Alps, *The Cryosphere*, <https://doi.org/10.5194/tc-2017-267>

- Vicente-Serrano, S.M. y López-Moreno, J. 2008. The nonstationary influence of the North Atlantic Oscillation on European precipitation. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*. 113, D20120.
- Vicente-Serrano, S.M.; López-Moreno, J. y Beguería, S. 2007. La precipitación en el Pirineo español: diversidad espacial en las tendencias y escenarios futuros. *Pirineos*, 162: 43-69.

2 El Impacto del CC en los sectores biofísicos

2.1 El cambio climático durante el Holoceno

- Beguería, S., López-Moreno, J.I., Lorente, A., Seeger, M., García-Ruiz, J.M. 2003. Assessing the effect of climate oscillations and land-use changes on streamflow in the Central Spanish Pyrenees. *Ambio* 32: 283-286.
- Benito, G., Thorndycraft, V.R., Rico, M., Sánchez-Moya, Y., Sopeña, A., 2008. Palaeoflood and floodplain records from Spain: evidence for long-term climate variability and environmental changes. *Geomorphology* 101, 68-77.
- Camarero, J.J., García-Ruiz, J.M., Sangüesa-Barreda, G., Galván, J.D., Alla, A.Q., Sanjuán, Y., Beguería, S., Gutiérrez, E. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 47 (4): 773-783.
- Corella J.P. B.L. Valero-Garcés, F. Wang, A. Martínez-Cortizas, C.A. Cuevas, A. Saiz-Lopez., 2017. 7 00 years reconstruction of mercury and lead atmospheric deposition in the Pyrenees (NE Spain) *Atmospheric Environment* 155: 97-107
- Corella, J.P., Stefanova, V., El Anjoumi, A., Rico, E., Giralt, S., Moreno, A., Plata-Montero, A., Valero-Garcés, B.L., 2013. A 2500-year multi-proxy reconstruction of climate change and human activities in northern Spain: The Lake Arreo record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 386, 555–568.
- Corella, J.P., Valero-Garcés, B.L., Vicente-Serrano, S.M., Brauer, A., Benito, G., 2016. Three millennia of heavy rainfalls in Western Mediterranean: frequency, seasonality and atmospheric drivers. *Scientific Reports* 6, 38206; doi: 10.1038/srep38206
- Galop, D., Rius D., Cugny, C. & Mazier, F. 2013. A history of long-term Human – Environment interactions in the French Pyrenees inferred from pollen data. In Lozny L.R. (ed). *Continuity and Change in cultural adaptation to mountain environments. Studies in Human Ecology and Adaptation* 7. Springer, p : 19-30.
- Gil-Romera G., González-Sampériz P. Lasheras-Álvarez L., Miguel Sevilla-Callejo M., Moreno A. Valero-Garcés B., López-Merino, L., Carrión, J., Pérez Sanz A., Aranbarri J., García-Prieto Fronce, E. 2014. Biomass-modulated fire dynamics during the last glacial-interglacial transition at the Central Pyrenees (Spain). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 402 : 113 - 124
- García-Ruiz, J.M., López-Moreno, J.I., Lasanta, T., Vicente-Serrano, S.M., González-Sampériz, P., Valero-Garcés, B.L., Sanjuán, Y., Beguería, S., Nadal-Romero, E., Lana-Renault, N., Gómez-Villar, A. 2015. Los efectos geoecológicos del Cambio Global en el Pirineo Central español: Una revisión a distintas escalas espaciales y temporales. *Pirineos* 170, e012. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/Pirineos.2015>.
- García-Ruiz, J.M., Palacios, D., De Andrés, N., Valero-Garcés, B.L., López-Moreno, J.I., Sanjuán, Y. 2014. Holocene and ‘Little Ice Age’ glacial activity in the Marboré Cirque, Monte Perdido Massif, Central Spanish Pyrenees. *The Holocene* 24: 1439-1452.
- García-Ruiz, J.M.; Palacios, D.; González-Sampériz, P.; de Andrés, N.; Moreno, A.; Valero-Garcés, B.; Gómez-Villar, A. 2016. Mountain glacier evolution in the Iberian Peninsula during the Younger Dryas. *Quaternary Science Reviews*, 138: 16–30
- Giralt, S., Moreno, A., Cacho, I. & Valero-Garcés, B.L. 2017. A comprehensive overview of the last 2,000 years Iberian Peninsula climate history, *CLIVAR Exchanges* No. 73, 5-10
- González-Sampériz, P.; Aranbarri, J.; Pérez-Sanz, A.; Gil-Romera, G.; Moreno, A.; Leunda, M.; Sevilla-Callejo, M.; Corella, J.P.; Morellón, M.; Oliva, B.; Valero-Garcés, B. 2017. Environmental and climate change in the southern Central Pyrenees since the Last Glacial Maximum: A view from the lake records. *Catena* 149 : 668-688.
- Leunda, M., González-Sampériz, P.; Gil-Romera, G.; Aranbarri, J.; Moreno, A.; Oliva-Urcia, B.; Sevilla, M.; Valero-Garcés, B.L. 2017. The Late-Glacial and Holocene Marboré Lake sequence (2612 m a.s.l., Central Pyrenees, Spain): Testing high altitude sites sensitivity to millennial scale vegetation and climate variability. *Global and Planetary Change* 157: 214-231 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.08.008>)
- López-Moreno, J. I., Revuelto, J., Rico, I., Chueca-Cía, J., Julián, A., Serreta, A., Serrano, E., Vicente-Serrano, S. M., Azorín-Molina, C., Alonso-González, E., and García-Ruiz, J.M., 2016 : Thining of the Monte Perdido Glacier in the Spanish Pyrenees since 1981. *The Cryosphere* 10, 681-694.
- Mayewski PA, Rohling EE, Stager JC et al. 2004. Holocene climate variability. *Quaternary Research* 62: 243–255.
- Montserrat, J. 1992. Evolución glaciar y postglaciar del clima y la vegetación en la vertiente sur del Pirineo: Estudio palinológico. Instituto Pirenaico de Ecología, Zaragoza, 147 pp.
- Morellón, M., Pérez-Sanz, A., Corella, J.P., Büntgen, U., Catalán, J., González-Sampériz, P., González-Trueba, J.J., López-Sáez, J.A., Moreno, A., Pla-Rabes, S., Saz-Sánchez, M.Á., Scussolini, P., Serrano, E., Steinhilber, F., Stefanova, V., Vegas-Vilarrúbia, T.,

- Valero-Garcés, B., 2012. A multi-proxy perspective on millennium-long climate variability in the Southern Pyrenees. *Clim. Past* 8, 683-700.
- Morellón, M. Valero-Garcés, B., Vegas-Villarubia, T., González-Sampériz, P., Romero, O., Delgado-Huertas, A., Mata, P., Moreno, A., Rico, Mayte, Corella, J.P. 2009. Lateglacial and Holocene palaeohydrology in the western Mediterranean region: The Lake Estanya record (NE Spain). *Quaternary Science Review*, 28 : 2582-2599
 - Oliva-Urcia, B; Leunda, M., Moreno, A.; Valero-Garcés, B.,González-Sampériz, P., Gil-Romera, G., Mata, M. P., HORDA Group. 2018. Last deglaciation and Holocene environmental change at high altitude in the Pyrenees: the geochemical and paleomagnetic record from Marboré Lake (N Spain). *Journal of Paleolimnology* <https://doi.org/10.1007/s10933-017-0013-9>
 - Oliva, M., J. Ruiz-Fernández, M. Barriendos, G. Benito, J.M. Cuadrat, F. Domínguez-Castro, J.M. García-Ruiz, S. Giralt, A. Gómez-Ortiz, A. Hernández, O. López-Costas, J.I. López-Moreno, J.A. López-Sáez, A. Martínez-Cortizas, A. Moreno, M. Prohom, M.A. Saz, E. Serrano, E. Tejedor, R. Trigo, B. Valero-Garcés, S.M. Vicente-Serrano. 2018. The Little Ice Age in Iberian mountains. *Earth-Science Reviews* 177: 175-208
 - Pérez-Sanz, A., P. González-Sampériz, A. Moreno, B. Valero-Garcés, G. Gil-Romera, M. Rieradevall, P. Tarrats, L. Lasheras-Álvarez, M. Morellón, A. Belmonte, C. Sancho, M. Sevilla-Callejo, A. Navas. 2013. Holocene climate variability, vegetation dynamics and fire regimen in the Central Pyrenees: the Basa de la Mora sequence (NE Spain). *Quaternary Science Reviews* 73: 149-179
 - Pla, S., Catalan, J., 2011. Deciphering chrysophyte responses to climate seasonality. *J Paleolimnol* 46, 139-150.
 - Rius, D., Vannièrre, B. and Galop, D. 2012. Holocene history of fire, vegetation and land use from the central Pyrenees (France). *Quaternary Research* 77: 54-64
 - Vicente-Serrano S.M. y Juan I. López-Moreno 2008: The nonstationary influence of the North Atlantic Oscillation on European precipitation. *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*. 113, D20120, doi:10.1029/2008JD010382.
 - Biodiversidad de montaña: fauna.
 - Alexander, Jake & Chalmandrier, Loïc & Lenoir, Jonathan & Burgess, Treena & Essl, Franz & Haider, Sylvia & Kueffer, Christoph & Mcdougall, Keith & Milbau, Ann & Nuñez, Martín & Pauchard, Anibal & Rabitsch, Wolfgang & Rew, Lisa & Sanders, Nathan & Pellissier, Loïc. (2017). Lags in the response of mountain plant communities to climate change. *Global Change Biology*. 24.10.1111/gcb.13976.
 - Araújo, M. B., Alagador, D., Cabeza, M., Nogués-Bravo, D., & Thuiller, W. (2011). Climate change threatens European conservation areas. *Ecology letters*, 14(5), 484-492.
 - Barrett, R. T. (2014). Has climate change resulted in a mismatch between the spring arrival of the Common Cuckoo *Cuculus canorus* and its hosts in North Norway?.
 - Benadi, G., Hovestadt, T., Poethke, H. J., & Blüthgen, N. (2014). Specialization and phenological synchrony of plant-pollinator interactions along an altitudinal gradient. *Journal of Animal Ecology*, 83(3), 639-650.
 - Bichet, C., Ferrandiz-Rovira, M., Claramunt, B., Figueroa, I. et al. Multiple geographic origins and high genetic differentiation of the Alpine marmots reintroduced in the Pyrenees. (2016) *Conservation Genetics*. DOI: 10.1007/s10592-016-0851-4
 - Briedis, M., Beran, V., Hahn, S., & Adamík, P. (2016). Annual cycle and migration strategies of a habitat specialist, the Tawny Pipit *Anthus campestris*, revealed by geolocators. *Journal of Ornithology*, 157(2), 619-626.
 - Buisan, S. T., Saz, M. A., & López-Moreno, J. I. (2015). Spatial and temporal variability of winter snow and precipitation days in the western and central Spanish Pyrenees. *International Journal of Climatology*, 35(2), 259-274.
 - Capdevila-Argüelles L., B. Zilletti y V.A. Suárez Álvarez (2011). Cambio climático y especies exóticas invasoras en España. Diagnóstico preliminar y bases de conocimiento sobre impacto y vulnerabilidad. Documento de síntesis. Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Madrid, 17 pág.
 - Caruso, N. M., Sears, M. W., Adams, D. C., & Lips, K. R. (2014). Widespread rapid reductions in body size of adult salamanders in response to climate change. *Global Change Biology*, 20(6), 1751-1759.
 - Catalan, J., Ninot, J. M., & Aniz, M. M. (2017). The High Mountain Conservation in a Changing World. In *High Mountain Conservation in a Changing World* (pp. 3-36). Springer, Cham.
 - Charmantier, A., & Gienapp, P. (2014). Climate change and timing of avian breeding and migration: evolutionary versus plastic changes. *Evolutionary Applications*, 7(1), 15-28.
 - Cubas, J., Martín-Esquivel, J. L., Nogales, M., Irl, S. D., Hernández-Hernández, R., López-Darias, M., ... & González-Mancebo, J. M. (2017). Contrasting effects of invasive rabbits on endemic plants driving vegetation change in a subtropical alpine insular environment. *Biological Invasions*, 1-15.
 - Dastansara, N., Vaissi, S., Mosavi, J., & Sharifi, M. (2017). Impacts of temperature on growth, development and survival of larval *Bufo (Pseudepidalea) viridis* (Amphibia: Anura): implications of climate change. *Zoology and Ecology*, 1-7.
 - de Pous, P., Montori, A., Amat, F., & Sanuy, D. (2016). Range contraction and loss of genetic variation of the Pyrenean endemic newt *Calotriton asper* due to climate change. *Regional environmental change*, 16(4), 995-1009.
 - Flousek, J., Telenský, T., Hanzelka, J., & Reif, J. (2015). Population trends of Central European montane birds provide evidence for adverse impacts of climate change on high-altitude species. *PloS one*, 10(10), e0139465.

- García-González, R., Aldezabal, A., Laskurain, N. A., Margalida, A., & Novoa, C. (2016). Factors affecting diet variation in the Pyrenean rock ptarmigan (*Lagopus muta pyrenaica*): Conservation implications. *PloS one*, 11(2), e0148614.
- García, R. A., Cabeza, M., Rahbek, C., & Araújo, M. B. (2014). Multiple dimensions of climate change and their implications for biodiversity. *Science*, 344(6183), 1247579.
- Green, D. M. (2017). Amphibian breeding phenology trends under climate change: Predicting the past to forecast the future. *Global change biology*, 23(2), 646-656.
- Gordo, O., & Sanz, J. J. (2005). Phenology and climate change: a long-term study in a Mediterranean locality. *Oecologia*, 146(3), 484-495.
- Herrera, J. M., Ploquin, E. F., Rodríguez-Pérez, J., & Obeso, J. R. (2014). Determining habitat suitability for bumblebees in a mountain system: a baseline approach for testing the impact of climate change on the occurrence and abundance of species. *Journal of biogeography*, 41(4), 700-712.
- Kolářová, E., Matiu, M., Menzel, A., Nekovář, J., Lumpe, P., & Adamík, P. (2017). Changes in spring arrival dates and temperature sensitivity of migratory birds over two centuries. *International journal of biometeorology*, 61(7), 1279-1289.
- Kourkgy, C., Garel, M., Appolinaire, J., Loison, A., & Toïgo, C. (2016). Onset of autumn shapes the timing of birth in Pyrenean chamois more than onset of spring. *Journal of Animal Ecology*, 85(2), 581-590.
- McCarty, J. P., Wolfenbarger, L. L., & Wilson, J. A. (2017). Biological impacts of climate change. eLS.
- Martínez-Freiría, F. (2015). Assessing climate change vulnerability for the Iberian viper *Vipera seoanei*. *Basic and Applied Herpetology*, 29, 61-80.
- Miller-Struttman, N. E., Geib, J. C., Franklin, J. D., Kevan, P. G., Holdo, R. M., Ebert-May, D., ... & Galen, C. (2015). Functional mismatch in a bumble bee pollination mutualism under climate change. *Science*, 349(6255), 1541-1544.
- Møller, A.P., Rubolini, D., & Lehikoinen, E. 2008. Populations of migratory birds species that did not show a phenological response to climate change are declining. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 105: 16195–16200.
- Morán-Tejeda, E., López-Moreno, J. I., & Sanmiguel-Valladolid, A. (2017). Changes in climate, snow and water resources in the Spanish Pyrenees: observations and projections in a warming climate. In *High Mountain Conservation in a Changing World* (pp. 305-323). Springer, Cham.
- Morueta-Holme, N., Fløjgaard, C., & Svenning, J. C. (2010). Climate change risks and conservation implications for a threatened small-range mammal species. *PloS one*, 5(4), e10360.
- Novoa, C., Astruc, G., Desmet, J. F., & Besnard, A. (2016). No short-term effects of climate change on the breeding of Rock Ptarmigan in the French Alps and Pyrenees. *Journal of Ornithology*, 157(3), 797-810.
- Ornos, C., Torres, F., & De la Rúa, P. (2017). Updated list of bumblebees (Hymenoptera: Apidae) from the Spanish Pyrenees with notes on their decline and conservation status. *Zootaxa*, 4237(1), 41-77.
- Pacifici, M., Foden, W. B., Visconti, P., Watson, J. E., Butchart, S. H., Kovacs, K. M., ... & Corlett, R. T. (2015). Assessing species vulnerability to climate change. *Nature Climate Change*, 5(3), 215.
- Palomo, I. (2017). Climate change impacts on ecosystem services in high mountain areas: A literature review. *Mountain Research and Development*, 37(2), 179-187.
- Panuccio, M., Martín, B., Morganti, M., Onrubia, A., & Ferrer, M. (2017). Long-term changes in autumn migration dates at the Strait of Gibraltar reflect population trends of soaring birds. *Ibis*, 159(1), 55-65.
- Parmesan C. (2006) Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 37: 637–669. doi: 10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110100
- Pauchard, A., Milbau, A., Albiñ, A., Alexander, J., Burgess, T., Daehler, C., ... & Haider, S. (2016). Non-native and native organisms moving into high elevation and high latitude ecosystems in an era of climate change: new challenges for ecology and conservation. *Biological invasions*, 18(2), 345-353.
- Petitpierre, B., McDougall, K., Seipel, T., Broennimann, O., Guisan, A., & Kueffer, C. (2016). Will climate change increase the risk of plant invasions into mountains?. *Ecological Applications*, 26(2), 530-544.
- Phillimore, A.B., Hadfield, J.D., Jones, O.R., Smithers, R.J. (2010). Differences in spawning date between populations of common frog reveal local adaptation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107, 8292-8297.
- Piracés, V. J., López-Flores, R., & Pérez-Collazos, E. (2015). Estudio poblacional y biométrico del tritón pirenaico en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. Lucas Mallada. *Revista de Ciencias*, (17), 177-195.
- Pound, J.A., Bustamante, M.R., Coloma, L.A., Consuegra, J.A., Fogden, M.P.L., Foster, P.N., La Marca, E., Masters, K.L., Merino-Viteri, A., Puschendorf, R., Ron, S.R., Sanchez-Azofeifa, G.A., Still, C.J., Young, B.E. (2006). Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming, *Nature*, 439, 161-167.
- Prodon, R., Geniez, P., Cheylan, M., Devers, F., Chuine, I., & Besnard, A. (2017). A reversal of the shift towards earlier spring phenology in several Mediterranean reptiles and amphibians during the 1998-2013 warming slowdown. *Global change biology*.
- Pysek, P., Genovesi, P., Pergl, J., Monaco, A., & Wild, J. (2013). Plant invasions of protected areas in Europe: An old continent

- facing new problems. In L. C.
- Rasmont, P., Franzén, M., Lecocq, T., Harpke, A., Roberts, S. P., Biesmeijer, J. C., ... & Gonthier, Y. (2015). Climatic risk and distribution atlas of European bumblebees (pp. 236-p). Sofia: Pensoft.
 - Romo, H., García-Barros, E., Márquez, A. L., Moreno, J. C., & Real, R. (2014). Effects of climate change on the distribution of ecologically interacting species: butterflies and their main food plants in Spain. *Ecography*, 37(11), 1063-1072.
 - Rousselet, J., Zhao, R., Argal, D., Simonato, M., Battisti, A., Roques, A., & Kerdelhué, C. (2010). The role of topography in structuring the demographic history of the pine processionary moth, *Thaumetopoea pityocampa* (Lepidoptera: Notodontidae). *Journal of biogeography*, 37(8), 1478-1490
 - Sánchez-Fernández, D., Rizzo, V., Cieslak, A., Faille, A., Fresneda, J., & Ribera, I. (2016). Thermal niche estimators and the capability of poor dispersal species to cope with climate change. *Scientific reports*, 6, 23381.
 - Schmitt, T., Habel, J. C., Rödder, D., & Louy, D. (2014). Effects of recent and past climatic shifts on the genetic structure of the high mountain Yellow-spotted ringlet butterfly *Erebia manto* (Lepidoptera, Satyrinae): a conservation problem. *Global change biology*, 20(7), 2045-2061.
 - Schweiger, O., Settele, J., Kudrna, O., Klotz, S., & Kühn, I. (2008). Climate change can cause spatial mismatch of trophically interacting species. *Ecology*, 89(12), 3472-3479.
 - Settele, J., Kudrna, O., Harpke, A., Kühn, I., Van Swaay, C., Verovnik, R., ... & Kühn, E. (2008). Climatic risk atlas of European butterflies (p. 710). Sofia-Moscow: Pensoft.
 - Singer, M. C., & Parmesan, C. (2010). Phenological asynchrony between herbivorous insects and their hosts: signal of climate change or pre-existing adaptive strategy?. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 365(1555), 3161-3176.
 - Thuiller W, Albert C, Araujo MB, Berry PM, Cabeza M, Guisan A, Hickler T, Midgley GF, Paterson J, Schurr FM, Sykes MT, Zimmermann NE (2008) Predicting global change impacts on plant species' distributions: future challenges. *Perspect Plant Ecol Evol Syst* 9:137–152.doi:10.1016/j.ppees.2007.09.004
 - Thuiller W, Lavergne S, Roquet C, Boulangeat I, Lafourcade B, Araujo MB (2011) Consequences of climate change on the tree of life in Europe. *Nature* 470:531–534. doi:10.1038/nature09705
 - Toïgo, M., Barraquand, F., Barnagaud, J. Y., Piou, D., & Jactel, H. (2017). Geographical variation in climatic drivers of the pine processionary moth population dynamics. *Forest Ecology and Management*, 404, 141-155.
 - Vitasse, Y., Signarbieux, C., & Fu, Y. H. (2018). Global warming leads to more uniform spring phenology across elevations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(5), 1004-1008.
 - Walther, G. R. (2010). Community and ecosystem responses to recent climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1549), 2019-2024.
 - Willisich, C. S., Bieri, K., Struch, M., Franceschina, R., Schnidrig-Petrig, R., & Ingold, P. (2013). Climate effects on demographic parameters in an un hunted population of Alpine chamois (*Rupicapra rupicapra*). *Journal of mammalogy*, 94(1), 173-182.
 - Wilson, R. J., Gutiérrez, D., Gutiérrez, J., Martínez, D., Agudo, R., & Monserrat, V. J. (2005). Changes to the elevational limits and extent of species ranges associated with climate change. *Ecology Letters*, 8(11), 1138-1146.

2.3 Biodiversidad de montaña: flora

- Adler P.B. et al., 2011. Productivity is a poor predictor of plant species richness. *Science* 333, 1750-1753.
- Araújo M.B. et al., 2011. Climate change threatens European conservation areas. *Ecology Letters* 14, 484- 492.
- Baudière A. & Gauquelin T., 2005. Évolution actuelle de la végétation des milieux supraforestiers oriento-pyrénéens. *Bull. Soc. Hist. Nat. Toulouse*, 141-2 :5-14.
- Baron J.S. et al., 2009. Options for national parks and reserves for adapting to climate change. *Environmental Management* 44, 1033-1042.
- Beniston M. et al., 1996. The Impacts of Climate Change on Mountain Regions. In Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Chapter 5, Cambridge University Press, 191-213.
- Bergamini A. et al., 2009. An elevational shift of cryophilous bryophytes in the last century – an effect of climate war-ming? *Diversity and Distributions* 15, 871-879.
- Bodin J. et al., 2013. Shifts of forest species along an elevational gradient in Southeast France: climate change or stand maturation? *Journal of vegetation science*, 24 (2), 269–283
- Bodin J., 2010. Observed changes in mountain vegetation of the Alps during the XXth century: role of climate and land-use changes. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré (Nancy 1), Vandoeuvre-lès-Nancy, FRA, Gottfried Wilhelm Leibniz University of Hanover, DEU. 210 p.
- Bonhote J. & Vernet J.L., 1988. La « mémoire des charbonnières”. Essai de reconstitution des milieux forestiers dans une vallée marquée par la métallurgie (Aston, Haute-Ariège). *Revue forestière française*, 40 (3) :197-212.

- Braun-Blanquet, 1948. La végétation alpine des Pyrénées orientales. Etude de phytosociologie comparée, Ed. Instituto español de edafología, ecología y fisiología vegetal, Barcelone. 306 p.
- Brooker R.W., 2006. Plant-plant interactions and environmental change. *New Phytologist* 171, 271-284.
- Callaway R.M. et al., 2002. Positive interactions among alpine plants increase with stress. *Nature* 417, 844- 848.
- Colwell R.K. et al., 2008. Global warming, elevational range shifts, and lowland biotic attrition in the wet tropics. *Science* 322, 258-261.
- Corriol G. & Mikolajczak A., 2014. Contribution au Prodrome des végétations de France : les Salicetea herbaceae Braun-Blanq. 1948. *J. Bot. Soc. bot. France*, 68 : 15-49.
- Estiarte & Peñuelas 2015, Alteration of the phenology of leaf senescence and fall in winter deciduous species by climate change: effects on nutrient proficiency. *Glob Chang Biol.* 21(3):1005-17
- Eynard M., 1978. Contribution à l'étude écologique de deux groupements végétaux à *Salix herbacea* des environs du col de l'Iseran. *Trav. Sci. Parc Nat. Vanoise* 9 : 25-51.
- Gallien L. et al., 2016. Is There Any Evidence for Rapid, Genetically-Based, Climatic Niche Expansion in the Invasive Common Ragweed? *PLoS ONE* 11(4): e0152867. doi:10.1371/journal.pone.0152867
- Galop D & Jalut G., 1994. Differential human impact and vegetation history in two adjacent valleys in the Ariege's basin, southern France, from 3000 BP to the present. *Vegetation History and Archeobotany*, 3, 225-244.
- Gonin P. (coord.), Fady B., Musch B., Métaillé J.-P., Galop D., de Munnik N., Cunill R., Poublanc S., Abbe J.-L., Corriol G., Sajdak G., Delarue A., Valette P., Drenou Ch. : 2014 - Caractérisation génétique et origine du Sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) de Ste Croix Volvestre (Ariège) et du massif pyrénéen. – PNR Pyrénées Ariégeoises, IDF, mai 2014, 160 p.
- Gottfried M. et al., 2102. Continent-wide response of mountain vegetation to climate change. *Nature Climate Change*. DOI: 10.1038/NCLIMATE1329
- Grabherr, 2003. Alpine vegetation dynamics and climate change - a synthesis of long-term studies and observation. In : Nagy L., Grabherr G., Körner C., Thompson DBA (eds), *Alpine Biodiversity in Europe*. Springer, Berlin, pp. 399-409.
- Grime J.P. et al., 2000. The response of two contrasting limestone grasslands to simulated climate change. *Science* 5480, 762-765.
- Grime J.P., 1973. Competitive exclusion in herbaceous vegetation. *Nature* 242, 344-347.
- Harsch M.A. et al., 2009. Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming. *Ecology Letters* 12, 1040-1049.
- Heegaard et Vand-vik, 2004. Climate change affects the outcome of competitive interactions – an application of principal response curves. *Oecologia* 139 : 459-466.
- Holzapfel A.M. & Vinebrooke R.D., 2005. Environmental warming increases invasion potential of alpine lake communities by imported species. *Global Change Biology* 11, 2009-2015.
- Jolly W.M. et al., 2005. Divergent vegetation growth responses to the 2003 heat wave in the Swiss Alps. *Geophysical Research Letters* 32 L18409.
- Jump A.S. et al., 2006. Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica*. *Global Change Biology* 12, 2163-2174.
- Komac B. & Olicard L., 2014. Monitoring protocol for vegetation in the Pyrenees snowfields. *Mountain Research Initiative News*, 8, 16-17.
- Komac B., Esteban P., Trapero L. & Caritg R., 2016. Modelization of the Current and Future Habitat Suitability of *Rhododendron ferrugineum* Using Potential Snow Accumulation. *PLoS ONE* 11(1):e0147324. doi:10.1371/journal.pone.0147324.
- Le Bagousse-Pinguet Y., Maalouf J.P., Touzard B. & Michalet R., 2014. Importance, but not intensity of plant interactions relates to species diversity under the interplay of stress and disturbance. *Oikos*, 123: 777-785.
- Le Treut H. (dir.), 2013, Les impacts du changement climatique en Aquitaine. Un état des lieux scientifique. Presses Universitaires de Bordeaux, LGPA Éditions, Pessac, 369 p.
- Lefèvre F. & Collin E. (coord.), 2012. La Commission des ressources génétiques forestières (CRGF): regards sur 20 ans d'actions et nouveaux enjeux. *Rendez-vous techniques de l'Office national des forêts*, 36-37: 9-56.
- Lenoir J. et al., 2010. Going against the flow: potential mechanisms for unexpected downslope range shifts in a warming climate. *Ecography* 33, 295-303.
- Linderholm H.W., 2006. Growing season changes in the last century. *Agricultural and Forest Meteorology* 137, 1-14.
- Lluent A., Anadon-Rosell A., Ninot J. M., Grau O. & Carrillo E., 2013, Phenology and seed setting success of snowbed plant species in contrasting snowmelt regimes in the Central Pyrenees, *Flora*, 208 : 220- 231.
- Mäkinen H. et al., 2002. Radial growth variation of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) across latitudinal and altitudinal gradients in central and northern Europe. *Forest Ecology and Management* 171, 243-259.
- Malaval, S., Dupin, B. & Dantin, G., 2015. Conservation et restauration de la flore dans un contexte anthropisé, quelles solutions ? in : Rey, F., Dutoit, T., Cote, F., Lescourret, F. *Sciences Eaux & Territoires*, 16, 70-74.

- Marcora P. et al., 2008. The performance of *Polylepis australis* trees along their entire altitudinal range: implications of climate change for their conservation. *Diversity and Distributions* 14, 630-636.
- Martín-Vide J. (coord. cient.), 2016. Tercer informe sobre el canvi climàtic a Catalunya (TICCC). Generalitat de Catalunya i Institut d'Estudis Catalans, 626 p.
- McCain C.M. & Colwell R.K., 2011. Assessing the threat to montane biodiversity from discordant shifts in temperature and precipitation in a changing climate. *Ecology Letters* 14, 1236-1245.
- Menzel A. et al., 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology* 12, 1969-1976.
- Menzel A. & Fabian P., 1999. Growing season extended in Europe, *Nature* 397, 659.
- Michalet R. et al., 2006. Do biotic interactions shape both sides of humped-back models of species richness in plant communities? *Ecology Letters* 9, 767-773.
- Michalet R., Vitasse Y. & Delzon S., 2015. Rôle des interactions plante-plante dans la réponse des forêts au changement climatique : l'exemple des forêts de chêne sessile et de hêtre dans les Pyrénées occidentales. *Innovations Agronomiques* 47 (2015), 97-108.
- Moncorps S. (dir.), 2014. Panorama des services écologiques fournis par les écosystèmes français, étude de cas : les écosystèmes montagnards d'Aquitaine. UICN France, Paris, 40 p.
- Moncorps S. (dir.), 2015. Changement climatique et risques naturels dans les montagnes tempérées. UICN France, Paris, 40 p.
- Pauchard A. et al., 2016. Non-native and native organisms moving into high elevation and high latitude ecosystems in an era of climate change: new challenges for ecology and conservation. *Biol Invasions*, 18 (2), 345-353
- Pauli H. et al., 2004. The GLORIA Field Manual—Multi-Summit Approach (Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg,
- Pauli H. et al., 2012. Recent Plant Diversity Changes on Europe's Mountain Summits. *Science*, 336, 353-355.
- Peñuelas et al., 2013. Evidence of current impact of climate change on life: a walk from genes to the biosphere». *Global Change Biology*, 19, 2303-2338.
- Rivas-Ubach A., Sardans J., Pérez-Trujillo M., Estiarte M. & Peñuelas J., 2012. Strong relationship between elemental stoichiometry and metabolome in plants, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109 (11) 4181-4186.
- Savva Y. et al., 2006. Interannual growth response of Norway spruce to climate along an altitudinal gradient in the Tatra Mountains, Poland. *Trees - Structure and Function* 20, 735-746.
- Theurillat J.-P. & Guisan A., 2001. Potential impact of climate change on vegetation in the European Alps: A review. *Climatic change* 50, 77-109.
- Thomas C.D., 2010. Climate, climate change and range boundaries. *Diversity and Distributions* 16, 488-495.
- UICN, 2012, Catégories et Critères de la Liste rouge de l'UICN : Version 3.1, Deuxième édition. Gland, Suisse et Cambridge, Royaume-Uni : UICN. vi + 32pp., Originellement publié en tant que IUCN Red List Categories and Criteria: Version 3.1, Second edition. (Gland, Switzerland and Cambridge, UK: IUCN, 2012).
- Valadon A., 2009. Effets des interventions sylvicoles sur la diversité génétique des arbres forestiers: analyse bibliographique. Office national des forêts, Paris. Les dossiers forestiers, 21, 157 p.
- Villar L. & Dendaletche C., 1994. . Pyrenees. France, Spain and Andorra. In Davis S.D., Heywood V. H. & Hamilton A.C. (eds.), *Centres of Plants Diversity. a Guide and Strategy for their Conservation*, Infonnation Press, Oxford, 1: 61-64.
- Vitasse Y. et al., 2009. Leaf phenology sensitivity to temperature in European trees: do within-species populations exhibit similar responses? *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 735-744.
- Vitasse Y. et al., 2010. Quantifying plasticity of leaf phenology in response to temperature for two temperate tree species using transplant experiments. *Functional Ecology* 24, 1211-1218.
- Winkler M. et al., 2016. The rich sides of mountain summits – a pan-European view on aspect preferences of alpine plants. *Journal of biogeography*, 43 (11), 2261-2273

2.4 Bosques

- Ameztegui, A., Coll, L., Brotons, L., & Ninot J.M. (2016) Land-use legacies rather than climate change are driving the recent upward shift of the mountain treeline in the Pyrenees. *Global Ecology and Biogeography* 25(3): 267-273.
- Améztegui, A., Brotons, L., & Coll, L. (2010). Land-use changes as major drivers of mountain pine (*Pinus uncinata* Ram.) expansion in the Pyrenees. *Global Ecology and Biogeography*, 19, 632-641.
- Aussenac, G. (2000). Interactions between forest stands and microclimate: ecophysiological aspects and consequences for silviculture. *Annals of Forest Science*, 57(3), 287-301.
- BADEAU V., DUPOUEY J.L., CLUZEAU C., DRAPIER J., 2005. Aires potentielles de répartition des espèces forestières d'ici 2100. *Forêt-entreprise*, 162, 25-29.
- Bertrand, R., Lenoir, J., Piedallu, C., Riofrio-Dillon, G., de Ruffray, P., Vidal, C., Pierrat, J.-C., & Gégout, J.-C. (2011). Changes in

- plant community composition lag behind climate warming in lowland forests. *Nature*, 479, 517-520.
- Bontemps, J. D., Hervé, J. C., Leban, J. M., & Dhôte, J. F. (2011). Nitrogen footprint in a long-term observation of forest growth over the twentieth century. *Trees*, 25(2), 237-251.
 - Bréda N, Huc R, Granier A, Dreyer E. (2006). Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science* 63: 625–644.
 - Bréda, N., & Badeau, V. (2008). Forest tree responses to extreme drought and some biotic events: towards a selection according to hazard tolerance?. *Comptes Rendus Geoscience*, 340(9-10), 651-662.
 - Camarero, J. J., & Gutiérrez, E. (2004). Pace and pattern of recent treeline dynamics: response of ecotones to climatic variability in the Spanish Pyrenees. *Climatic change*, 63(1-2), 181-200.
 - Camarero JJ, Bigler C, Linares JC, Gil-Pelegrín E. (2011). Synergistic effects of past historical logging and drought on the decline of Pyrenean silver fir forests. *For Ecol Manag* 262:759-769
 - Camarero JJ, Gazol A, Sangüesa-Barreda, G, Oliva, J, Vicente-Serrano, SM. (2015). To die or not to die: early warnings of tree dieback in response to a severe drought. *Journal of Ecology* 103, 44-57
 - Casals P, Baiges T, Bota G, Chocarro C, de Bello F, Fanlo R, Sebastià MT, & Taüll M. (2009). Silvopastoral systems in the Northeastern Iberian Peninsula. A Multifunctional Perspective. In: Rigueiro-Rodríguez A, McAdam JH, Mosquera-Losada MR (Eds) *Agroforestry in Europe: Current Status and Future Prospects*. Cap. 9, pp. 161-181 Springer-Berlag. ISBN 978-1-4020-8271-9.
 - Charru M. (2012) La productivité forestière dans un environnement changeant : caractérisation multi-échelle de ses variations récentes à partir des données de l'inventaire forestier national (IFN) et interprétation environnementale. Mémoire de thèse, INRA, France.
 - Chauvin S., Daubet B., Bertrand P. (2011) – Annexe technique de l'action « Evolutions climatiques et forêts de montagne ». Projet OPCC EFA 235/11.
 - Cheaib, A., Badeau, V., Boe, J., Chuine, I., Delire, C., Dufrêne, E., François, C., Gritti, E. S., Legay, M., Pagé, C., Thuiller, W., Viovy, N. and Leadley, P. (2012), Climate change impacts on tree ranges: model intercomparison facilitates understanding and quantification of uncertainty. *Ecology Letters*, 15: 533-544
 - Courbaud, B., Kunstler, G., Morin, X., & Cordonnier, T. (2010). Quel futur pour les services écosystémiques de la forêt alpine dans un contexte de changement climatique?. *Journal of Alpine Research| Revue de géographie alpine*, (98-4).
 - Daubet, B., De Miguel Magaña, S., Maurette, A. (2007). Livre blanc des forêts pyrénéennes : Pour une gestion durable des Pyrénées. Projet INTERREG SILVAPYR. FORESPIR.
 - Dobbertin, M. (2005). Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review. *European Journal of Forest Research*, 124(4), 319-333.
 - Drénou, C., Giraud, F., Gravier, H., SABATIER, S., & Caraglio, Y. (2013). Le diagnostic architectural: un outil d'évaluation des sapinières dépérissantes.
 - Ferretti, M., Nicolas, M., Bacaro, G., Brunialta, G., Calderisi, M., Croisé, L., Frati, L., Lanier, M., Maccherini, S., Santi, E., & Ulrich, E. (2014). Plot-scale modelling to detect size, extent, and correlates of changes in tree defoliation in French high forests. *Forest Ecology and management*, 311, 56-69.
 - Franceschini T., Charru M. et Constant T. (2012) L'estimation de la biomasse et de la productivité forestières à l'épreuve des changements environnementaux. *Revue Forestière Française*, Numéro1-2012, France.
 - Garcia-Pausas J, Romanyà J, Montané F, Ríos A, Taull M., Rovira P, Casals P, 2017. Are soil carbon stocks in mountain grasslands compromised by land-use changes?. In Jordi Catalan, Josep M^a Ninot, Merce Aniz (Eds.) *High Mountain Conservation in a Changing World. Advances in Global Change Research* 62. Springer Open Chapter 9, pp. 207 -230
 - González-Olabarria, J. R., Mola-Yudego, B., & Coll, L. (2015). Different factors for different causes: analysis of the spatial aggregations of fire ignitions in Catalonia (Spain). *Risk analysis*, 35, 1197-1209.
 - Gonzalez, J. R., Palahi, M., Trasobares, A., & Pukkala, T. (2006). A fire probability model for forest stands in Catalonia (north-east Spain). *Annals of Forest Science*, 63, 169-176.
 - Gottfried, M., Pauli, H., Futschik, A., Akhalkatsi, M., Barančok, P., Alonso, J. L. B., ... & Krajčič, J. (2012). Continent-wide response of mountain vegetation to climate change. *Nature Climate Change*, 2(2), 111.
 - Goudet, M. (2015). Réseau systématique de suivi des dommages forestiers, quelques informations sur l'état sanitaire de la forêt française. Paris, France: Département de la santé des forêts.
 - Gunderson, L. H. (2000). Ecological resilience—in theory and application. *Annual review of ecology and systematics*, 31(1), 425-439
 - Jump, A. S., Hunt, J. M., & Penuelas, J. (2006). Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica*. *Global Change Biology*, 12(11), 2163-2174
 - Kahle, H. P. (Ed.). (2008). Causes and consequences of forest growth trends in Europe: Results of the recognition project (Vol. 21). Brill
 - Kullman, L. (2002). Rapid recent range-margin rise of tree and shrub species in the Swedish Scandes. *Journal of ecology*,

- 90(1), 68-77
- Lasanta, T., & Vicente-Serrano, S. M. (2007). Cambios en la cubierta vegetal en el Pirineo aragonés en los últimos 50 años. *Pirineos*, 162, 125-154.
 - Le Treut, H. (2013) Les impacts du changement climatique en Aquitaine. Dynamiques environnementales. Presses Universitaires de Bordeaux LGPA-Editions
 - Lebourgeois, F., Drénou, C., Bouvier, M., & Lemaire, J. (2015). Caractérisation de la croissance des chênaies pédonculées atlantiques dépérissantes: effets des sécheresses et relation avec l'architecture des houppiers. *Revue Forestière Française*, 4-2015, 333-351.
 - Lenoir, J., Gégout, J. C., Marquet, P. A., De Ruffray, P., & Brisse, H. (2008). A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *science*, 320(5884), 1768-1771.
 - L. Matias 2012 Cambios en los limites de distribución de especies como consecuencia de las variaciones climáticas. *Ecosistemas* 21 [91-96] AEET, Asociación española de ecología terrestre.
 - Maaf, & IGN (2016). Indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines, édition 2015, Résultats. Paris, France: Maaf-IGN.
 - Manion, P. D. (1981). *Tree disease concepts*. Prentice-Hall, Inc..
 - Martínez, I., González-Taboada, F., Wiegand, T., Camarero, J. J., & Gutiérrez, E. (2012). Dispersal limitation and spatial scale affect model based projections of *Pinus uncinata* response to climate change in the Pyrenees. *Global Change Biology*, 18(5), 1714-1724.
 - M.B. García, C.L. Alados¹, R. Antor, J.L. Benito Alonso, J.J. Camarero, F. Carmena, P. Errea, F. Fillat, R. García-González, J.M. García-Ruiz, M. Gartzia, D. Gómez García, I. Gómez, P. González-Sampériz, E. Gutiérrez, J.J. Jiménez, J.I. López-Moreno, P. Mata, A. Moreno, P. Montserrat, P. Nuche, I. Pardo, J. Revuelto, M. Rieradevall (†), H. Sáiz, P. Tejero, S. Vicente-Serrano, E. Villagrasa, L. Villar, B. Valero-Garcés, (2016), Integrando escalas y métodos LTER para comprender la dinámica global de un espacio protegido de montaña: el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. *Ecosistemas* 25, [19-30]. AEET, Asociación española de ecología terrestre.
 - Montané, F., Casals, P., Taull, M., Lambert, B., & Dale, M. R. (2009). Spatial patterns of shrub cover after different fire disturbances in the Pyrenees. *Annals of Forest Science*, 66, 1-8.
 - Moriondo, M., Good, P., Durao, R., Bindi, M., Giannakopoulos, C., & Corte-Real, J. (2006). Potential impact of climate change on fire risk in the Mediterranean area. *Climate Research*, 31, 85-95.
 - Montané F, Rovira P, Casals P. 2007. Shrub encroachment into mesic mountain grasslands in the Iberian peninsula: Effects of plant quality and temperature on soil C and N stocks. *Global Biogeochemical Cycles*, 21, doi:10.1029/2006GB002853
 - Nageleisen, L.-M. (2014). *Quelques indicateurs de la santé des forêts françaises (1989-2014)*. Paris, France: Département de la santé des forêts.
 - Nageleisen, L.-M., & Goudet, M. (2011). *Manuel de notation des dommages forestiers (symptoms, causes, état des cimes)*. Paris, France: Département de la santé des forêts.
 - Nageleisen, L.-M., & Taillardat, J. (2016). *Histoire de la santé des forêts: surveillance sanitaire en forêt et naissance du réseau des correspondants observateurs du Département de la santé des forêts (DSF)*. Paris, France: Département de la santé des forêts.
 - Nellemann, C., & Thomsen, M. G. (2001). Long-term changes in forest growth: potential effects of nitrogen deposition and acidification. *Water, Air, and Soil Pollution*, 128(3-4), 197-205
 - N. Perez, A. Ferré, J. Carreras, X. Font (2011) Efectos del cambio climático sobre la distribución potencial de los hábitats subalpinos y alpinos del Pirineo Catalán y Andorrano. *Actes del IX coloqui Internacional de Botanica Pirenaico-Cantabrica à Ordino, Andorra*, 329-341
 - ONERC (2015) *L'arbre et la forêt à l'épreuve d'un climat qui change*.
 - Pardo, I., Camarero, J. J., Gutiérrez, E., & García, M. B. (2013). Uncoupled changes in tree cover and field layer vegetation at two Pyrenean treeline ecotones over 11 years. *Plant Ecology & Diversity*, 6(3-4), 355-364
 - Pauli, H., Gottfried, M., Dullinger, S., Abdaladze, O., Akhalkatsi, M., Alonso, J. L. B., ... & Ghosn, D. (2012). Recent plant diversity changes on Europe's mountain summits. *Science*, 336(6079), 353-355
 - Peñuelas, J., & Boada, M. (2003). A global change-induced biome shift in the Montseny mountains (NE Spain). *Global change biology*, 9(2), 131-140
 - Piedallu, C., Perez, V., Gégout, J. C., Lebourgeois, F., & Bertrand, R. (2009). Impact potentiel du changement climatique sur la distribution de l'Épicéa, du Sapin, du Hêtre et du Chêne sessile en France.
 - P. Regato (2008) *Adapting to Global Change, Mediterranean Forest*, IUCN, Gland, Switzerland and Malaga, Spain.
 - Rixen C. Wipf S. Non equilibrium in alpine plant assemblages: Shifts in Europe's summit floras. In Jordi Catalan, Josep M^a Ninot, Merce Aniz (Eds.) *High Mountain Conservation in a Changing World. Advances in Global Change Research* 62. Springer Open chapter 12, pp. 207 -230.
 - Roux A., Dhôte J.-F. (Coordinateurs), Achat D., Bastick C., Colin A., Bailly A., Bastien J.-C., Berthelot A., Bréda N., Caurla S.,

- Carnus J.-M., Gardiner B., Jactel H., Leban J.-M., Lobianco A., Loustau D., Meredieu C., Marçais B., Martel S., Moisy C., Pâques L., Picart-Deshors D., Rigolot E., Saint-André L., Schmitt B. (2017). Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique? Une étude des freins et leviers forestiers à l'horizon 2050. Rapport d'étude pour le Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, INRA et IGN, 101 p. + 230 p. (annexes).
- Rouyer, E., Marty, P., & Chauvin, S. (2014). Rapport technique OPCC: Evaluation de l'impact du changement climatique sur l'évolution des écosystèmes forestiers. Toulouse, France: Observatoire Pyrénéen des Changements Climatiques.
 - Ryan, M. G., Binkley, D., & Fownes, J. H. (1997). Age-related decline in forest productivity: pattern and process. In *Advances in ecological research* (Vol. 27, pp. 213-262). Academic Press.
 - Solberg, S., Dobbervin, M., Reinds, G. J., Lange, H., Andreassen, K., Fernandez, P. G., ... & de Vries, W. (2009). Analyses of the impact of changes in atmospheric deposition and climate on forest growth in European monitoring plots: a stand growth approach. *Forest Ecology and Management*, 258(8), 1735-1750.
 - Spiecker, H., Mielikäinen, K., Köhl, M., & Skovsgaard, J. P. (1996). Growth Trends in European Forests—Studies From 12 Countries. European Forest Institute Research Report 5
 - Soubeyroux, J. M., Kitova, N., Blanchard, M., Vidal, J. P., Martin, E., & Dandin, P. (2012). Caractérisation des sécheresses des sols en France et changement climatique: Résultats et applications du projet ClimSec. *La Météorologie*, 78, p-21.
 - Thapa, B., Holland, S. M., & Absher, J. D. (2004). The relationship between wildfires and tourist behaviors in Florida: an exploratory study.
 - Villiers, T. (2016). Guide de gestion des forêts Pyrénéennes à rôle de protection. Office National des Forêts. 9200-16-GUI-SAM-058.

2.5 Ecosistemas sensibles de alta montaña: lagos y turberas

- Arellano, L., P. Fernández, R. Fonts, N. L. Rose, U. Nickus, H. Thies, E. Stuchlík, L. Camarero, J. Catalan, and J. O. Grimalt. 2015. Increasing and decreasing trends of the atmospheric deposition of organochlorine compounds in European remote areas during the last decade. *Atmos. Chem. Phys.* 15:6069-6085.
- Bacardit, M. and L. Camarero. 2010. Modelling Pb, Zn and As transfer from terrestrial to aquatic ecosystems during the ice-free season in three Pyrenean catchments. *Science of The Total Environment* 408:5854-5861.
- Camarero, L., P. Masqué, W. Devos, I. Ani-Ragolta, J. Catalan, H. C. Moor, S. Pla, and J. A. Sanchez-Cabeza. 1998. Historical variations in lead fluxes in the Pyrenees (NE Spain) from a dated lake sediment core. *Water, Air, Soil Pollut.* 105:439-449.
- Camarero, L., Felip, M., Ventura, M., Bartumeus, F. & Catalan, J. (1999) The relative importance of the planktonic food web in the carbon cycle of an oligotrophic mountain lake in a poorly vegetated catchment (Redó, Pyrenees). *J.Limnol.*, 58, 203-212.
- Camarero, L. y J. Catalán. 2012. Atmospheric phosphorus deposition may cause lakes to revert from phosphorus limitation back to nitrogen limitation. *Nat Commun* 3:1118.
- Camarero, L. 2017. Atmospheric Chemical Loadings in the High Mountain: Current Forcing and Legacy Pollution. Pages 325-341 in J. Catalan, J. M. Ninot, and M. Aniz, editors. *High Mountain Conservation in a Changing World*. Springer International Publishing.
- Catalan, J.; Barbieri, M. G.; Bartumeus, F. [et al.] (2009). Ecological thresholds in European alpine lakes. *Freshwater Biology*, 54, p. 2494-2517.
- Catalan, J.; Pla, S.; Rieradevall, M. [et al.] (2002) Lake Redo ecosystem response to an increasing warming in the Pyrenees during the twentieth century. *Journal of Paleolimnology*, 28, p. 129-145.
- Catalan et al. 1993. Chemical composition of disturbed and undisturbed high mountain lakes in the Pyrenees: a reference for acidified sites. *Wat.Res.* 27:133-141.
- Catalan, et al 2006. High mountain lakes: extreme habitats and witnesses of environmental changes. *Limnetica* 25:551-584.
- Felip, M. & Catalan, J. (2000) The relationship between phytoplankton biovolume and chlorophyll in a deep oligotrophic lake: decoupling in their spatial and temporal maxima. *J.Plankton Res.*, 22, 91-105.
- Heras, P., Infante Sánchez, M., Pontevedra-Pombal, X & Novoa-Muñoz, J.C. 2017. Mires and Peatland of Europe. Spain
- Elser, J. J., T. Andersen, J. S. Baron, A.-K. Bergstrom, M. Jansson, M. Kyle, K. R. Nydick, L. Steger, and D. O. Hessen. 2009. Shifts in Lake N:P Stoichiometry and Nutrient Limitation Driven by Atmospheric Nitrogen Deposition. *Science* 326:835-837.
- Le Roux, G, S.V. Hansson, S.V. y Claust. A. 2016. Inorganic Chemistry in the Mountain Critical Zone: Are the Mountain Water Towers of Contemporary Society Under Threat by Trace Contaminants?. In: *Mountain Ice and Water*, p: 131-148. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-63787-1.00003-2>
- Mata, M.P., Moreno, A., Oliva-Urcia, B., Valero-Garcés, B., Rico, M.T., 2013. Registro histórico de la contaminación atmosférica por Pb en el Lago de Marboré (PN de Ordesa y Monte Perdido). *Macla*.
- Miró, A., & Ventura, M. (2013). Historical use, fishing management and lake characteristics explain the presence of non-native trout in Pyrenean lakes: Implications for conservation. *Biological Conservation*, 167, 17-24.
- Parish, F., Sirin, A., Charman, D., Joosten, H., Minayeva, T., Silvius, M. and Stringer, L. (Eds.) 2008. *Assessment on Peatlands*,

- Biodiversity and Climate Change: Main Report. Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International, Wageningen. 206 p.
- Schneider, P. and S. J. Hook. 2010. Space observations of inland water bodies show rapid surface warming since 1985. *Geophys. Res. Lett.* 37:L22405.
 - Sommaruga, R., B. Sattler, A. Oberleiter, A. Wille, S. Wögrath-Sommaruga, R. Psenner, M. Felip, L. Camarero, S. Pina, R. Gironés, and J. Catalan. 1999. An in situ enclosure experiment to test the solar UVB impact on plankton in a high-altitude mountain lake. II. Effects on the microbial food web. *Journal of Plankton Research* 21:859-876.
 - Ventura, M., Camarero, L., Buchaca, T., Bartumeus, F., Livingstone, D. M. & Catalan, J. (2000). The main features of seasonal variability in the external forcing and dynamics of a deep mountain lake (Redó, Pyrenees). *J.Limnol.* 59, 97-108.

2.6 Ciclo hidrológico y recursos hídricos.

- ACA - Agència Catalana de l'Aigua (2015), Pla de Gestió del Districte de Conca Fluvial de Catalunya 2016-2021. Barcelona: Generalitat de Catalunya.
- AEAG - Agence de l'eau Adour-Garonne, (2011), Changements climatiques et Eaux souterraines. Etat des connaissances sur le bassin Adour-Garonne, 122 p.
- Agarwal, A., Angeles, M.S.D., Bhatia, R., Chéret, I., Davila-Poblete, S., Falkenmark, M., Villarreal, F.G., Jønch-Clausen, T., Kadi, M.A., Kindler, J., Rees, J., Roberts, P., Rogers, P., Solanes, M., Wright, A., 2000. Integrated Water Resources Management. Technical Advisory Committee Background Papers, 4. Stockholm, Sweden, Global Water Partnership.
- Agarwal, A., Angeles, M.S.D., Bhatia, R., Chéret, I., Davila-Poblete, S., Falkenmark, M., Villarreal, F.G., Jønch-Clausen, T., Kadi, M.A., Kindler, J., Rees, J., Roberts, P., Rogers, P., Solanes, M., Wright, A., 2000. Integrated Water Resources Management. Technical Advisory Committee Background Papers, 4. Stockholm, Sweden, Global Water Partnership.
- Agència Catalana de l'Aigua (ACA). (2009) Aigua i canvi climàtic: Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya. Barcelona, Generalitat de Catalunya.
- Barnett, T. P., J. C. Adam, and D. P. Lettenmaier (2005), Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions, *Nature*, 438(11), 303-309.
- Batalla, R. J.; Gomez, C. M.; Kondolf, G. M. (2004). Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (Northeastern Spain). *Journal of Hydrology*, 290, p. 117-136.
- Beguería S., Campos P., Serrano R., Álvarez A. (2015) Producción, usos, renta y capital ambientales del agua en los sistemas forestales de Andalucía. En: Biodiversidad, usos del agua forestal y recolección de setas silvestres en los sistemas forestales de Andalucía (Campos P., Díaz M., eds). Memorias científicas de RECAMAN. Volumen 2. Memoria 2.2. Editorial CSIC, Madrid.
- Beguería S., Campos P., Serrano R., Álvarez A., 2015. Producción, usos, renta y capital ambientales del agua en los sistemas forestales de Andalucía. En: Biodiversidad, usos del agua forestal y recolección de setas silvestres en los sistemas forestales de Andalucía (Campos P., Díaz M., eds). Memorias científicas de RECAMAN. Volumen 2. Memoria 2.2. Editorial CSIC, Madrid.
- Beguería, S., López-Moreno, J. I., Lorente, A., Seeger, M., & García-Ruiz, J. M. (2003). Assessing the effect of climate oscillations and land-use changes on streamflow in the Central Spanish Pyrenees. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 32(4), 283-286.
- Berger, L., R. Speare, H. B. Hines, et al. 2004. Effect of Season and Temperature on Mortality in Amphibians due to Chytridiomycosis. *Australian Veterinary Journal* 82(7): 434-439.
- Blaustein, Andrew R., and Joseph M. Kiesecker. 2002. Complexity in Conservation: Lessons from the Global Decline of Amphibian Populations. *Ecology Letters* 5(4): 597-608.
- Buendia, C., Batalla, R. J., Sabater, S., Palau, A., and Marcé, R. (2016) Runoff Trends Driven by Climate and Afforestation in a Pyrenean Basin. *Land Degrad. Develop.*, 27: 823-838. doi: 10.1002/ldr.2384.
- Buendía, C.; Bussi, G.; Tuset, J. [et al.] (2016). Effects of afforestation on runoff and sediment load in an upland Mediterranean catchment. *Science of the Total Environment*. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.07.005.
- Caballero, Y., S. Voirin-Morel, F. Habets, J. Noilhan, P. LeMoigne, A. Lehenaff, and A. Boone (2007), Hydrological sensitivity of the Adour-Garonne river basin to climate change, *Water Resour. Res.*, 43, W07448, doi:10.1029/2005WR004192.
- Candela, I.; tamoh, K.; Olivares, G. (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, p. 253-260.
- Candela, L.; Tamoh, K.; Olivares, G. (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, p. 253-260.
- Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE), 2015, The Ebro Water Management Plan. Zaragoza.
- CHE - Confederación Hidrográfica del Ebro (2005). Evaluación preliminar de la incidencia del cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca del Ebro (Clave 2005-PH-22-I). Oficina de Planificación Hidrológica, Condeferación Hidrográfica del Ebro. Zaragoza.
- de Mendoza Barberà, Guillermo. Los macro-invertebrados lacustres y el gradiente altitudinal en los Pirineos, 2013. Tesis

- Doctoral, Universidad de Barcelona, Dept. de Ecología. <http://hdl.handle.net/2445/45523>.
- Dingman SL (2002) *Physical Hydrology*. 2nd ed. New Jersey, Prentice-Hall.
 - Elsen, Paul R., and Morgan W. Tingley. 2015. Global Mountain Topography and the Fate of Montane Species under Climate Change. *Nature Climate Change* 5(8): 772–776.
 - Gallart F and Llorens P (2003). Catchment Management under Environmental Change: Impact of Land Cover Change on Water Resources. *Water International*. 28: 334-340
 - Gallart, F., Llorens, P., (2003), Catchment management under environmental change: Impact of land cover change on water resources. *Water International*, 28(3), p. 334-340.
 - Gallart, F.; Delgado, J.; Beatson, S. J. V. [et al.] (2011). Analysing the effect of global change on the historical trends in water resources in the headwaters of the Llobregat and Ter river basins (Catalonia, Spain). *Physics and Chemistry of the Earth*, 36, p. 655-661.
 - Gallart, Francesc, and Pilar Llorens. "Catchment management under environmental change: impact of land cover change on water resources." *Water International* 28.3 (2003): 334-340.
 - Gallart, Francesc, and Pilar Llorens. "Observations on land cover changes and water resources in the headwaters of the Ebro catchment, Iberian Peninsula." *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 29.11 (2004): 769-773.
 - García Ruiz, J.M.; Beguería, S.; López-Moreno, J.I.; Lorente Grima, A.; Seeger, M. (2001) Los recursos hídricos superficiales del Pirineo aragonés y su evolución reciente. 192, Geoforma Ediciones, Logroño.
 - García-Ruiz JM, López-Moreno JI, Vicente SM, Lasanta-Martínez T, Beguería S. (2011) Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth Science Reviews*, 105(3-4), 121–139.
 - Giuntoli I. et Renard B. (2010). Rapport ONEMA–Cemagref: Identification des impacts hydrologiques du changement climatique: constitution d'un réseau de référence pour la surveillance des étiages.
 - Gomà J, Rimet F, Cambra J, Hoffmann L, Ector L. (2005). Diatom Communities and Water Quality Assessment in Mountain Rivers of the Upper Segre Basin (La Cerdanya, Oriental Pyrenees). *Hydrobiologia*. 551(1): 209–225.
 - Green, T. R., M. Taniguchi, H. Kooi, J. J. Gurdak, D. M. Allen, K. M. Hiscock, H. Treidel and A. Aureli (2011), Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater, *J. of Hydr.*, 405(3–4), 532-560, doi:10.1016/j.jhydrol.2011.05.002.
 - Habets, F., Boé, J., Déqué, M., Ducharne, A., Gascoin, S., Hachour, A., Martin, E., Pagé, C., Sauquet, E., Terray, L., Thiéry, D., Oudin, L., Viennot, P. (2013), Impact of climate change on the hydrogeology of two basins in northern France, 121 (4), 771-785.
 - Hari, R.E., D.M. Livingstone, R. Siber, P. Burkhardt-Holm, & H. Güttinger, 2006. Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. *Global Change Biology*, 12: 10-26.
 - Hauer, F. R., J. S. Baron, D. H. Campbell, K. D. Fausch, S. W. Hostetler, G. H. Leavesley, P.R. Leavitt, D. M. McKnight, and J. A. Stanford (1997), *Assessment of climate change and freshwater ecosystems of the Rocky Mountains, USA and Canada*, *Hydrol. Processes*, 11, 903-924.
 - Healy RW & Cook PG (2002) Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal* 10: 91–109.
 - Huerta-Fontela M, Galceran MT, Ventura F. (2008). Stimulatory drugs of abuse in surface waters and their removal in a conventional drinking water treatment plant. *Environmental Science and Technology*. 42(18): 6809-16
 - Hunt, R., Jardine, T., Hamilton, S., Bunn, S., Knowledge, T.R.C., Knowledge, T.R.C., (2012). Temporal and spatial variation in ecosystem metabolism and food web carbon transfer in a wet-dry tropical river. *Freshw. Biol.* 57, 435–450.
 - Iglesias A, Garrote L, Flores F, Moneo M. (2007). Challenges to Manage the Risk of Water Scarcity and Climate Change in the Mediterranean. *Water Resources Management*. 21(5): 775–788
 - IHOBE-Sociedad Pública de Gestión Ambiental del Gobierno Vasco (2017). Colección KLIMATEK: Vulnerabilidad hídrica: de las tendencias del pasado reciente a las del futuro. Informe elaborado por el Grupo de Procesos Hidro-Ambientales de la Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU) (www.ihobe.eus/Publicaciones).
 - J. Boé, L. Terray, E. Martin, F. Habets (2009). Projected changes in components of the hydrological cycle in French river basins during the 21st century. *Water Resources Research* 45(8).
 - J.I. López-Moreno, S.M. Vicente-Serrano, J. Zabalza, J. Revuelto, M. Gilaberte, C. Azorín-Molina, E. Morán-Tejeda, J.M. García-Ruiz, C. Tague. Respuesta hidrológica del Pirineo central al cambio ambiental proyectado para el siglo XXI. *Pirineos*, 169, dec. 2014. ISSN 1988-428.
 - Jyrkama IM and Sykes JF (2007). The impact of climate change on spatially varying groundwater recharge in the grand river watershed. *Journal of Hydrology* 338: 237–250.
 - K. Stahl, H. Hisdal, J. Hannaford, L. Tallaksen, H. Van Lanen. (2010) Streamflow trends in Europe: evidence from a dataset of near-natural catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, 2367–2382.
 - Kim, J. H.; Jackson, R. B. (2012). A global analysis of groundwater recharge for vegetation, climate, and soils. *Vadose Zone Journal*, 11(1). DOI: 10.2136/vzj2011.0021RA.
 - Kovach RP, Gharrett AJ, Tallmon DA. Genetic change for earlier migration timing in a pink salmon population. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2012; 279(1743):3870-3878. doi:10.1098/rspb.2012.1158.
 - Kuusisto E (1984) Snow accumulation and snow melt in Finland. Helsinki Finland, National Board of Waters, Publications of

- the Water Research Institute 55.
- Le Treut, H. (2013) Les impacts du changement climatique en Aquitaine: un état des lieux scientifique. Pessac: Presses Universitaires de Bordeaux: LGPA-Editions, 365 p. (Dynamiques environnementales, HS 2013).
 - Le Treut, H. Les impacts du changement climatique en Aquitaine: un état des lieux scientifique. Presses universitaires de Bordeaux; 2013.
 - Lee LJE, Lawrence DSL and Price M (2006) Analysis of water level response to rainfall and implications for recharge pathways in the Chalk aquifer, SE England. *Journal of Hydrology* 330: 604–620.
 - Lespinas F, Ludwig W, Heussner S (2014) Hydrological and climatic uncertainties associated with modeling the impact of climate change on water resources of small Mediterranean coastal rivers. *Journal of Hydrology* 511:403–422.
 - Lespinas, F., Ludwig, W. & Heussner, S. (2010). Impact of recent climate change on the hydrology of coastal Mediterranean rivers in Southern France. *Climatic Change* 99:425, <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9668-1>.
 - López-Moreno, J. I. (2005). Recent variations of snowpack depth in the Central Spanish Pyrenees. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 37(2), 253–260.
 - López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Moran-Tejeda, E., Zabalza, J., Lorenzo-Lacruz, J., and García-Ruiz, J. M. (2011) Impact of climate evolution and land use changes on water yield in the ebro basin, *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 311–322.
 - López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Moran-Tejeda, E., Zabalza, J., Lorenzo-Lacruz, J., and García-Ruiz, J. M. (2011) Impact of climate evolution and land use changes on water yield in the ebro basin, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 311–322, <https://doi.org/10.5194/hess-15-311-2011>.
 - López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Zabalza, J., Revuelto, J., Gilaberte, M., Azorín-Molina, C., Morán-Tejeda, E., García-Ruiz, J. M. & Tague, C. (2014). Respuesta hidrológica del Pirineo central al cambio ambiental proyectado para el siglo XXI. *Pirineos*, 169, e004.
 - López-Moreno, J.I. (2005). Recent variations of snowpack depth in the Central Spanish Pyrenees. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 37(2), 253–260.
 - Lopez-Moreno, J.I., Goyette, S., Beniston, M. (2009). Impact of climate change on snowpack in the Pyrenees: Horizontal spatial variability and vertical gradients. *Journal of Hydrology*, 374(3–4), 384–396.
 - Manzano, A. (2009a). Exemples de modelització hidrològica en règim mitjà dels rius catalans en escenaris futurs. In : *Aigua i canvi climàtic: Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya*. Barcelona: Generalitat de Catalunya. Agència Catalana de l'Aigua, p. 127-141
 - Marcarelli, A., Van Kirk, R., Baxter, C., 2010. Predicting effects of hydrologic alteration and climate change on ecosystem metabolism in a western U.S. river. *Ecol. Appl.* 20, 2081–2088.
 - Martín-Vide, J.M. (coord.) (2016), Tercer informe sobre el canvi climàtic a Catalunya, Barcelona, Government of Catalonia, ISBN 978-84-9965-317-4, 615 p.
 - Mas-Pla, J. (2005). «Recursos hídrics, dinàmica hidrològica i canvi climàtic». A: Llebot, J. E. (ed.) *Informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*. Barcelona: Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible: Institut d'Estudis Catalans, p. 485-516.
 - Matthew J. Troia, Michael A. Denk, Keith B. Gido. Temperature-dependent performance as a driver of warm-water fish species replacement along the river continuum. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2016, 73:394-405, <https://doi.org/10.1139/cjfas-2015-0094>.
 - Meaurio, M. (2017). Assessing the hydrological response from an ensemble of climate projection in the transition zone of the Atlantic region (Bay of Biscay). Evaluation of SWAT model performance in small and forested catchments (Tesis doctoral no publicada). University of the Basque Country.
 - Murray, Kris A., Richard W. R. Retallick, Robert Puschendorf, et al. 2011. Assessing Spatial Patterns of Disease Risk to Biodiversity: Implications for the Management of the Amphibian Pathogen, *Batrachochytrium Dendrobatidis*: Spatial Patterns of Disease Risk. *Journal of Applied Ecology* 48(1): 163–173.
 - Nogués-Bravo, D., M.B. Araújo, M.P. Errea, and J.P. Martínez-Rica. 2007. Exposure of Global Mountain Systems to Climate Warming during the 21st Century. *Global Environmental Change* 17(3–4): 420–428.
 - Ortuño, f.; Jódar, J.; carrera, J. (2009). «Canvi climàtic i recàrrega d'aqüífers a Catalunya. A: agència catalana de l'aigua. *Aigua i canvi climàtic. Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya*. Barcelona: Generalitat de Catalunya: Agència Catalana de l'Aigua, p. 143-152.
 - P. Quintana-Seguí, A. Ribes, E. Martín, F. Habets, J. Boé. (2010) Comparison of three downscaling methods in simulating the impact of climate change on the hydrology of Mediterranean basins. *Journal of Hydrology*, 383(1–2), 111–124.
 - Pascual, D., Pla, E., Lopez-Bustins, J. A., et al. (2014). Impacts of climate change on water resources in the Mediterranean Basin. *Hydrological Sciences Journal*. DOI: 10.1080/02626667.2014.947290.
 - Pérez-Zanón Nuria, Javier Sigró, Linden Ashcroft, (2017). Temperature and precipitation regional climate series over the central Pyrenees during 1910-2013. *International Journal of Climatology*; 37 (4): 1922 DOI: 10.1002/joc.4823
 - Petrovic M, Ginebreda A, Acuna V, Batalla RJ, Elosegi A, Guasch H, de Alda ML, Marce R, Munoz I, Navarro-Ortega A et al.

- (2011). Combined scenarios of chemical and ecological quality under water scarcity in Mediterranean rivers. *Trac-Trends in Analytical Chemistry*. 30(8):1269-1278
- Piotrowski, Jeffrey S., Seanna L. Annis, and Joyce E. Longcore. 2004. Physiology of *Batrachochytrium Dendrobatidis*, a Chytrid Pathogen of Amphibians. *Mycologia* 96(1): 9.
 - Plan Hidrológico del Ebro 2015-2021, Confederación Hidrográfica del Ebro, Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente. Real Decreto 1/2016, de 8 de enero, BOE» núm. 16, de 19 de enero de 2016, páginas 2972 a 4301. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
 - Rutulis, M (1989) Groundwater drought sensitivity of southern Manitoba. *Canadian Water Resources Journal* 4: 18–33.
 - Samper, J., García Vera, M.A., Pisani, B., Alvares, D., Varela, A., y Losada, J.A. (2005). Modelos hidrológicos y Sistemas de Información Geográfica para la estimación de los recursos hídricos: aplicación de GIS-BALAN a varias cuencas Españolas. En: VII Jornadas de Zona no Saturada, ZNS'05, Coruña, 269-274.
 - Scheele, B. C., D. A. Driscoll, J. Fischer, et al. 2015. Landscape Context Influences Chytrid Fungus Distribution in an Endangered European Amphibian: Chytrid Fungus in Ephemeral Pond-Breeding Amphibians. *Animal Conservation* 18(5): 480–488.
 - Sophocleous M (2002) Interaction between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal* 10: 52–67.
 - Sutinen R, Hänninen P & Venäläinen A (2007) Effect of mild winter events on soil water content beneath snowpack. *Cold regions science and technology*. DOI:10.1016/2007.05.014.
 - Thompson, R., M. Ventura & L. Camarero, 2009. On the climate and weather of mountain and sub-arctic lakes in Europe and their susceptibility to future climate change. *Freshwater Biology* 54:2433-2451.
 - Val J, Chinarro D, Rosa Pino M, Navarro E. (2016a). Global change impacts on river ecosystems: A high-resolution watershed study of Ebro river metabolism. *Science of the Total Environment*. 569:774-783
 - Val J, Muniz S, Goma J, Navarro E. (2016c). Influence of global change-related impacts on the mercury toxicity of freshwater algal communities. *Science of the Total Environment*. 540:53-62
 - Val J, Pino R, Chinarro D. (2017). Development of a new methodology for the creation of water temperature scenarios using frequency analysis tool. *Sciences of the Total Environment*, in press, DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.06.064
 - Val J, Pino R, Navarro E, Chinarro D. (2016b). Addressing the local aspects of global change impacts on stream metabolism using frequency analysis tools. *Science of the Total Environment*. 569:798-814
 - Van der Kamp G and Maathuis H (1991) Annual fluctuations of groundwater levels as a result of loading by surface moisture. *Journal of Hydrology* 127: 137–152.
 - Veijalainen N (2008) Climate change effects on water resources and regulation in Eastern Finland. *Nordic Hydrological Conference 2008*.
 - Viviroli D, Weingartner R. (2008) "Water Towers"—A Global View of the Hydrological Importance of Mountains. In: Wiegandt E. (ed) *Mountains: Sources of Water, Sources of Knowledge*. *Advances in Global Change Research*, vol 31. Springer, Dordrecht.
 - Wake, David B., and Vance T. Vredenburg. 2008. Are We in the Midst of the Sixth Mass Extinction? A View from the World of Amphibians. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105(Supplement 1): 11466–11473.
 - Winter, T. C. (1999) Relation of streams, lakes, and wetland to groundwater flow systems. *Hydrogeology Journal* 7: 28–45.
 - Woodhams, Douglas C., Ross A. Alford, Cheryl J. Briggs, Megan Johnson, and Louise A. Rollins-Smith. 2008. Life-History Trade-Offs Influence Disease in Changing Climates: Strategies of an Amphibian Pathogen. *Ecology* 89(6): 1627–1639.
 - Yvan Caballero, Sophie Voirin-Morel, Florence Habets, Joël Noilhan, Patrick LeMoigne, Alain Lehenaff, Aaron Boone. (2007) Hydrological sensitivity of the Adour-Garonne river basin to climate change. *Water Resources Research*, 43, W07448.
 - Zabaleta, A., Meaurio, M., Uriarte, J.A., Morales, T., Antigüedad, I., 2017. Hydric vulnerability: recent hydrologic trends in the Bay of Biscay. 2nd International colloquium on Climate Change in mountain areas PYRADAPT 2017. *Proceedings* 72-76 (<https://drive.google.com/file/d/1vBJ2pKzlvF-5X7E4lj2gCxSeqkkoiz-K/view>).

3 Impacto del cambio climático en los sectores socioeconómicos

3.1 Turismo

- Chueca J, Julian A, Lopez-Moreno JI. 2007. Recent evolution (1981–2005) of the Maladeta glaciers, Pyrenees, Spain: extent and volume losses and their relation with climatic and topographic factors. *Journal of Glaciology* 53 (183): 547–557.
- Déqué, M., Martin, E., & Kitova, N. (2011). Response of the snow cover over France to climate change. *Res Atmospheric Ocean Model*, 41(7), 11-2.
- EEA, 2017. Climate change impacts and vulnerabilities in Europe 2016. An indicator-based report. No 1/2017
- ESPON Climate, 2011, Climate change and territorial effects on regions and local economies, Scientific Report, Institute of

- Spatial Planning (IRPUD), TU Dortmund University, Dortmund.
- Eurostat, 2015c, 'Tourism statistics at regional level-Statistics explained' (http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Tourism_statistics_at_regional_level).
 - Del Rio, M., Rico, I., Serrano, E., Tejado, J.J. 2014. Applying GPR and Laser Scanner Techniques to Monitor the Ossoue Glacier (Pyrenees). *JEEG*, December 2014, Volume 19, Issue 4, pp. 239–248
 - Franch, F. S., Villoslada, G. S., Bonet, F. V., & Sellés, C. G. (2015). Contribución al análisis nivométrico de los Pirineos orientales: La Molina, periodo 1956-1996. In *Clima, sociedad, riesgos y ordenación del territorio* (pp. 365-376).
 - Gilaberte-Búrdalo, M., López-Moreno, J. I., Morán-Tejada, E., Jerez, S., Alonso-González, E., López-Martín, F., & Pino-Otín, M. R. (2017). Assessment of ski condition reliability in the Spanish and Andorran Pyrenees for the second half of the 20th century. *Applied Geography*, 79, 127-142.
 - Houghton, J. T. (2001). *Climate change 2001: The scientific basis: Contribution of Working Group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press.
 - 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.
 - López-Moreno, J. I., Goyette, S., & Beniston, M. (2009). Impact of climate change on snowpack in the Pyrenees: Horizontal spatial variability and vertical gradients. *Journal of Hydrology*, 374(3), 384-396.
 - López-Moreno JI, Pomeroy J, Revuelto J, Vicente-Serrano SM (2013) Response of snow processes to climate change: spatial variability in a small basin in the Spanish Pyrenees. *Hydrol Process* 27(18):2637–2650
 - López-Moreno, J. I., Revuelto, J., Rico, I., Chueca-Cía, J., Julián, A., Serreta, A., ... & García-Ruiz, J. M. (2016). Thinning of the Monte Perdido Glacier in the Spanish Pyrenees since 1981. *The Cryosphere*, 10(2), 681-694.
 - Nogués-Bravo, D., Araújo, M. B., Errea, M. P., & Martínez-Rica, J. P. (2007). Exposure of global mountain systems to climate warming during the 21st Century. *Global Environmental Change*, 17(3), 420-428
 - Perrels, A., Heyndrickx, C., Pretenthaler, F., Kortschak, D., Ciari, F., Bösch, P., Kiviluoma, J., Azevedo, M., Ekholm, T., Crawford-Brown, D. and Thompson, A., 2015, Sectoral and cross-cutting multi-sector adaptation strategies for energy, transport and tourism, ToPDAd project, Deliverable 2.4
 - Pons, M., Moreno, J. L., Esteban, P., Macià, S., Gavalda, J., García, C., ... & Jover, E. (2014). Climate change influence on winter tourism in the Pyrenees. Experience from the NIVOPYR research project.
 - Pons, M., López-Moreno, J. I., Rosas-Casals, M. and Jover, E., (2015), 'The vulnerability of Pyrenean ski resorts to climate-induced changes in the snowpack', *Climatic Change* 131(4), 591–605 (doi: 10.1007/s10584-015-1400-8).
 - Raia, S., Alvioli, M., Rossi, M., Baum, R. L., Godt, J. W., & Guzzetti, F. (2013). Improving predictive power of physically based rainfall-induced shallow landslide models: a probabilistic approach. *arXiv preprint arXiv:1305.4803*.
 - René, P. 2017. *Les Glaciers des Pyrénées françaises Rapport d'étude 2016 - 2017*. Association Moraine
 - Rickards, L., Howden, M., & Crimp, S. (n.d.). Channelling the future? The use of seasonal climate forecasts in climate adaptation. *Climate Change Impact and Adaptation in Agricultural Systems*, 233-252. doi:10.1079/9781780642895.0233
 - Rico, I., Serrano, E., López Moreno, I., Revuelto, J., Atkinson, A., De San José, J.J. 2014. El glaciar de la maladeta (Pirineos): Evolución del frente y variabilidad ambiental (2010-2013) *The Maladeta Glacier (Pyrenees): Front evolution and environmental variability*. XIII Reunión Nacional de Geomorfología, Cáceres, 535–538.
 - Rico, I., Serrano, E., San José, J.J. & Del Río, M., 2016. Responses to Climatic Changes since the Little Ice Age on La Paul Glacier (Central Pyrenees). *Krei*, 13: 105-116. <http://hdl.handle.net/10810/18801>.
 - Rico, I., Izagirre, E., Serrano, E., López-Moreno, J. I. (2017). Current glacier area in the Pyrenees: an updated assessment 2016. *Pirineos*, 172, e029. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/Pirineos.2017.172004>
 - Rico, I., F. Magnin, J.I. López-Moreno, E. Alonso, J. Revuelto & E. Serrano: First evidence of permafrost occurrence in a steep rock wall in the Pyrenees: The Vignemale North Face. VI Iberian Congress of the International Permafrost Association, June 2017 Mieres (Spain).
 - Rixen, C., Teich, M., Lardelli, C., Gallati, D., Pohl, M., Pütz, M., & Bebi, P. (2011, 08). Winter Tourism and Climate Change in the Alps: An Assessment of Resource Consumption, Snow Reliability, and Future Snowmaking Potential. *Mountain Research and Development*, 31(3), 229-236. doi:10.1659/mrd-journal-d-10-00112.1
 - Rodrigues, L. M. C., Freire-González, J., Puig, A. G., & Puig-Ventosa, I. Costes y beneficios de la adaptación al cambio climático en el sector del turismo de nieve en España 1.
 - Rutt, M., D. Scott, P. Johnson, E. Jover, R. Steiger, and M. Pons. (2015). Behavioural adaptation of skiers to climatic variability and change in Ontario, Canada. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*. doi: 10.1016/j.jort.2015.07.002
 - Steiger, R., & Abegg, B. (2013). The sensitivity of Austrian ski areas to climate change. *Tourism Planning & Development*, 10(4), 480–493.
 - Steiger, R., & Stötter, J. (2013, 11). Climate Change Impact Assessment of Ski Tourism in Tyrol. *Tourism Geographies*, 15(4), 577-600. doi:10.1080/14616688.2012.762539
 - Stewart, E. J., Wilson, J., Espiner, S., Purdie, H., Lemieux, C., & Dawson, J. (2016). Implications of climate change for glacier tourism. *Tourism Geographies*, 18(4), 377-398.

3.2 Agropastoralismo de montaña

- AVEMAC project; JRC., 2012
- Bernues, A., Rodríguez-Ortega, T., Ripoll-Bosch, R., & Alfnes, F. (2014). Socio-cultural and economic valuation of ecosystem services provided by Mediterranean mountain agroecosystems. *PLoS one*, 9(7), e102479.
- Dalin, P., & Nylin, S. (2012). Host-plant quality adaptively affects the diapause threshold: evidence from leaf beetles in willow plantations. *Ecological Entomology*, 37(6), 490-499.
- De los Santos, B., Chamorro, M., Medina-Mínguez, J. J., Capote, N., Aguado, A., & Romero, F. (2016). 12 Emerging Diseases in Strawberry Crop: Charcoal Rot and Fusarium Wilt. *Strawberry: Growth, Development and Diseases*, 212.
- Donatelli, M., Srivastava, A. K., Duveiller, G., & Niemeier, S. (2012). Estimating impact assessment and adaptation strategies under climate change scenarios for crops at EU27 scale
- Donatelli, M., Srivastava, A. K., Duveiller, G., Niemeier, S., & Fumagalli, D. (2015). Climate change impact and potential adaptation strategies under alternate realizations of climate scenarios for three major crops in Europe. *Environmental Research Letters*, 10(7), 075005.
- Dumont, B., Andueza, D., Niderkorn, V., Lüscher, A., Porqueddu, C., & Picon-Cochard, C. (2015). A meta-analysis of climate change effects on forage quality in grasslands: specificities of mountain and Mediterranean areas. *Grass and Forage Science*, 70(2), 239-254.
- Estrada-Peña, A., Ayllón, N., & De La Fuente, J. (2012). Impact of climate trends on tick-borne pathogen transmission. *Frontiers in physiology*, 3, 64.
- Fraga, H., García de Cortázar Atauri, I., Malheiro, A. C., & Santos, J. A. (2016). Modelling climate change impacts on viticultural yield, phenology and stress conditions in Europe. *Global change biology*, 22(11), 3774-3788.
- Felten, B., Duru, M., Martin, G., Sautier, M., (2011). Changement climatique en Midi- Pyrénées et conséquences sur la croissance de l'herbe. *Projet Climfourrel, Midi- Pyrénées , Série Les Focus PSDR3*.
- Garibaldi, A., & Gullino, M. L. (2009, September). Emerging soilborne diseases of horticultural crops and new trends in their management. In VII International Symposium on Chemical and Non-Chemical Soil and Substrate Disinfestation 883 (pp. 37-47).
- García, M. B., Alados, C. L., Antor, R., Alonso, J. L. B., Camarero, J. J., Carmena, F., ... & Gartzia, M. (2016). Integrando escalas y métodos LTER para comprender la dinámica global de un espacio protegido de montaña: el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. *Ecosistemas*, 25(1), 19-30.
- Houghton, J. T. (2001). *Climate change 2001: The scientific basis: Contribution of Working Group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press.
- Husaini, A. M., & Xu, Y. W. (2016). 14 Challenges of Climate Change to Strawberry Cultivation: Uncertainty and Beyond. *Strawberry: Growth, Development and Diseases*, 262.
- Iriso A, Bueno R, De las Heras E, Lucientes J, Molina R. (2017) Cambio climático en España y su influencia en las enfermedades de transmisión vectorial. *Salud ambient;* 17(1):70-86.
- Jacquet, S., Huber, K., Pagès, N., Talavera, S., Burgin, L. E., Carpenter, S., ... & Lhor, Y. (2016). Range expansion of the Bluetongue vector, *Culicoides imicola*, in continental France likely due to rare wind-transport events. *Scientific reports*, 6, 27247.
- Klapwijk, M. J., Csóka, G., Hirka, A., & Björkman, C. (2013). Forest insects and climate change: long-term trends in herbivore damage. *Ecology and evolution*, 3(12), 4183-4196.
- Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., ... & Alewell, C. (2015). The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy*, 54, 438-447.
- Ponti, L., Gutierrez, A. P., Ruti, P. M., & Dell'Aquila, A. (2014). Fine-scale ecological and economic assessment of climate change on olive in the Mediterranean Basin reveals winners and losers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(15), 5598-5603.
- Ponti, L., Gutierrez, A. P., Ruti, P. M., & Dell'Aquila, A. (2014). Fine-scale ecological and economic assessment of climate change on olive in the Mediterranean Basin reveals winners and losers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(15), 5598-5603.
- Trnka, M., Hlavinka, P., & Semenov, M. A. (2015). Adaptation options for wheat in Europe will be limited by increased adverse weather events under climate change. *Journal of the Royal Society Interface*, 12(112), 20150721.
- Rickards, L., Howden, M., & Crimp, S. (n.d.). Channelling the future? The use of seasonal climate forecasts in climate adaptation. *Climate Change Impact and Adaptation in Agricultural Systems*, 233-252. doi:10.1079/9781780642895.0233
- Stoeckli, S., Hirschi, M., Spirig, C., Calanca, P., Rotach, M. W., & Samietz, J. (2012). Impact of climate change on voltinism and prospective diapause induction of a global pest insect—*Cydia pomonella* (L.). *PLoS one*, 7(4), e35723.
- Tanmoy, D., Majumdar, M. H. D., Devi, R. K. T., & Rajesh, T. (2016). Climate change impacts on plant diseases. *SAARC Journal of Agriculture*, 14(2), 200-209.
- Tanasijevic, L., Todorovic, M., Pereira, L. S., Pizzigalli, C., & Lionello, P. (2014). Impacts of climate change on olive crop

- evapotranspiration and irrigation requirements in the Mediterranean region. *Agricultural water management*, 144, 54-68.
- Trnka, M., Rötter, R. P., Ruiz-Ramos, M., Kersebaum, K. C., Olesen, J. E., Žalud, Z., & Semenov, M. A. (2014). Adverse weather conditions for European wheat production will become more frequent with climate change. *Nature Climate Change*, 4(7), 637-643.
- Williams, H. W., Cross, D. E., Crump, H. L., Drost, C. J., & Thomas, C. J. (2015). Climate suitability for European ticks: assessing species distribution models against null models and projection under AR5 climate. *Parasites & vectors*, 8(1), 440.

3.3 Energía

- Bangash, R. F., Passuello, A., Sanchez-Canales, M., Terrado, M., López, A., Elorza, F. J., ... & Schuhmacher, M. (2013). Ecosystem services in Mediterranean river basin: climate change impact on water provisioning and erosion control. *Science of the Total Environment*, 458, 246-255.
- Beniston, M., Stoffel, M., Clarvis, M. H., & Quevauviller, P. (2014). Assessing climate change impacts on the quantity of water in Alpine regions: Foreword to the adaptation and policy implications of the EU/FP7 "ACQWA" project. *Environmental Science & Policy*, 43, 1-4.
- Bloom, A., V. Kotroni and K. Lagouvardos (2008). "Climate change impact of wind energy availability in the Eastern Mediterranean using the regional climate model PRECIS." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 8(6): 1249e1257.
- Crook, J. A., Jones, L. A., Forster, P. M., & Crook, R. (2011). Climate change impacts on future photovoltaic and concentrated solar power energy output. *Energy & Environmental Science*, 4(9), 3101-3109.
- Dowling, P. (2013). The impact of climate change on the European energy system. *Energy Policy*, 60, 406-417.
- Flörke, M., Bärlund, I., & Kynast, E. (2012). Will climate change affect the electricity production sector? A European study. *Journal of Water and Climate Change*, 3(1), 44-54.
- Gaetani, M., T. Huld, E. Vignati, F. Monforti-Ferrario, A. Dosio and F. Raes (2014). "The near future availability of photovoltaic energy in Europe and Africa in climate-aerosol modeling experiments." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 38: 706e716.
- Hueging, H., Haas, R., Born, K., Jacob, D., & Pinto, J. G. (2013). Regional changes in wind energy potential over Europe using regional climate model ensemble projections. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(4), 903-917.
- Koch, H., Vögele, S., Hattermann, F. F., & Huang, S. (2015). The impact of climate change and variability on the generation of electrical power. *Meteorologische Zeitschrift*, 24, 173-188.
- López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Zabalza, J., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorin-Molina, C., & Morán-Tejeda, E. (2013). Hydrological response to climate variability at different time scales: A study in the Ebro basin. *Journal of hydrology*, 477, 175-188.
- López-Moreno, J. I., Pomeroy, J. W., Revuelto, J., & Vicente-Serrano, S. M. (2013). Response of snow processes to climate change: spatial variability in a small basin in the Spanish Pyrenees. *Hydrological Processes*, 27(18), 2637-2650.
- Mideksa, T. K., & Kallbekken, S. (2010). The impact of climate change on the electricity market: A review. *Energy Policy*, 38(7), 3579-3585.
- Morán-Tejeda, E., López-Moreno, J. I., & Sanmiguel-Vallelado, A. (2017). Changes in climate, snow and water resources in the Spanish Pyrenees: observations and projections in a warming climate. In *High Mountain Conservation in a Changing World* (pp. 305-323). Springer, Cham.
- Pereira-Cardenal, S. J., Madsen, H., Arnbjerg-Nielsen, K., Riegels, N., Jensen, R., Mo, B., ... & Bauer-Gottwein, P. (2014). Assessing climate change impacts on the Iberian power system using a coupled water-power model. *Climatic change*, 126(3-4), 351-364.
- Santos, J. A., Rochinha, C., Liberato, M. L. R., Reyers, M., & Pinto, J. G. (2015). Projected changes in wind energy potentials over Iberia. *Renewable Energy*, 75, 68-80.
- Van Vliet, M. T., Vögele, S., & Rübberke, D. (2013). Water constraints on European power supply under climate change: impacts on electricity prices. *Environmental Research Letters*, 8(3), 035010.
- Van Vliet, M. T., 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), 124021.

3.4 Riesgos naturales

- Agence de l'Eau Adour-Garonne, (2014). Analyse post-crue des cours de la Garonne amont, de la Pique, des Nestes et l'amont du Gave de Pau. ftp://oai:oai@ftp.eau-adour-garonne.fr/oaidocuments/60739_GAR_PYR_32577_1_GeoDiag_AEAG-PostCrue_Rapport_2014.pdf
- CGEDD – Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable (2015), Evaluation du plan national d'adaptation au changement climatique, Rapport n° 010178-01, 203 p.

- CGET (2015), L'adaptation des territoires au changement climatique, 210 p., http://www.cget.gouv.fr/sites/cget.gouv.fr/files/atoms/files/etude_changement-climatique.pdf
- Collins, M., R. Knutti, J. Arblaster, J.-L. Dufresne, T. Fichet, P. Friedlingstein, X. Gao, W.J. Gutowski, T. Johns, G. Krinner, M. Shongwe, C. Tebaldi, A.J. Weaver and M. Wehner, (2013): Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- DIACT (2008), *Changement climatique dans le massif alpin français : état des lieux et propositions pour le Commissariat à l'Aménagement et au développement des Alpes*, rapport rédigé par Philippe Langevin, Robert Mugnier et Emmanuelle Marcelpoil, 74 p., http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/etude_CADEPA_climat_cle055915.pdf
- EEA (2010), Mapping the impacts of natural hazards and technological accidents in Europe. An overview of the last decade. EEA Technical report, No 13/2010, ISSN 1725-2237;
- EEA (2017a), Climate change adaptation and disaster risk reduction in Europe. Enhancing coherence of the knowledge base, policies and practices, EEA Report No 15/2017, ISSN 1977-8449
- EEA (2017b), Financing urban adaptation to climate change, EEA Report No 2/2017, European Environment Agency.
- EU (2015), Towards an EU Research and Innovation policy agenda for Nature-Based Solutions & Re-Naturing Cities Final Report of the Horizon 2020 Expert Group on 'Nature-Based Solutions and Re-Naturing Cities, Directorate-General for Research and Innovation 2015 Climate Action, Environment, Resource Efficiency and Raw Materials EN (full version).
- Hartmann, D.L., A.M.G. Klein Tank, M. Rusticucci, L.V. Alexander, S. Brönnimann, Y. Charabi, F.J. Dentener, E.J. Dlugokencky, D.R. Easterling, A. Kaplan, B.J. Soden, P.W. Thorne, M. Wild and P.M. Zhai, (2013): Observations: Atmosphere and Surface. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC, (2012). Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaption (SREX), Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, 582 pp.
- IPCC, (2014): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>
- Lempert, R. J., Popper, S., W., Bankes, S., C., (2003). Shaping the next one hundred years: new methods for quantitative, long-term policy analysis. Rand Corporation, 187 p., https://www.rand.org/pubs/monograph_reports/MR1626.html
- Martin-Vide, J.M. (coord.) (2016), *Terçer informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*, Barcelona, Government of Catalonia, ISBN 978-84-9965-317-4, 615 p.
- MEDCIE (2008), *Etude des effets du changement climatique sur le Grand Sud-Est - Etape 1*, 98 p. http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/MEDCIE_RapportSynthese_040608_cle0ac9a9.pdf
- MEDDTL (2011), *Plan national d'adaptation de la France aux effets du changement climatique (2011-2015)*, 187 p.
- ONERC – Observatoire National sur les Effets du Changement Climatique, (2007), *Stratégie nationale d'adaptation au changement climatique*, 85 p., La documentation Française, ISBN : 978-2-11-00-6618-0
- ONERC, (2009), *Changement Climatique : Coûts des impacts et pistes d'adaptation*, Rapport au Premier ministre et au Parlement. La documentation Française.
- OPCC (2013), *Etude sur l'adaptation au changement climatique dans les Pyrénées: Analyse des démarches d'adaptation dans les Pyrénées*. 45 p. www.opcc-ctp.org
- Seneviratne, S. I., et al., (2012): Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* [C. B. Field, et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, pp. 109–230.
- UNEP (2014), *Green Infrastructure Guide for Water Management: Ecosystem-based management approaches for water-related infrastructure projects*, pp. 76, ISBN: 978-92-807-3404-1

Tesis

- Boudou, M., (2015). *Approche multidisciplinaire pour la caractérisation d'inondations remarquables Enseignements tirés de neuf évènements en France*. PhD Theses, Université Paul Valéry – Montpellier III. 184 pp.
- Copons, R. (2004): *Avaluació de la perillositat de caigudes de blocs rocosos a Andorra la Vella (Principat d'Andorra)*. Ph Thèses. Université de Barcelone, 244pp. +12 maps.
- González García, M. (2014). *La alta montaña periglacial en el pirineo central español: procesos, formas y condiciones ambientales*. PhD Thesis, Universidad de Málaga, Málaga, 900 pp.

Publicaciones científicas

- Allen, S. K., Fiddes, J., Linsbauer, A., Randhawa, S. S., Saklani, B., and Salzmann, N. (2016) Permafrost studies in Kullu district, Himachal Pradesh, *Curr. Sci.*, 111, 557–560, 2016
- Álvarez-Rodríguez, J., M.C. Llasat, T. Estrela, (2017). Analysis of geographic and orographic influence in Spanish monthly precipitation. *International Journal of Climatology*, DOI:10.1002/joc.5007
- Berthet, C., J. Dessens, J.L. Sanchez (2011), Regional and yearly variations of hail frequency and intensity in France, *Atmospheric Research*, 100, 391–400.
- Bodin X., Krysiecki J.M., Schoeneich P., Le Roux O., Lorier L., Echelard T., Peyron M., Walpersdorf A. (2016). The collapse of the Bérard rock glacier (Southern French Alps) in 2006. *Permafrost and Periglacial Processes*. DOI: 10.1002/ppp.1887
- Boeckli, L., Brenning, A., Gruber, S., et Noetzli, J. (2012) – Permafrost distribution in the European Alps: calculation and evaluation of an index map and summary statistics. *The Cryosphere* 6, 807–820. doi:10.5194/tc-6-807-2012
- Bulygina, N., McIntyre, N., and Wheeler, H., (2009), Conditioning rainfall-runoff model parameters for ungauged catchments and land management impacts analysis, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13, 893–904, doi:10.5194/hess-13-893-2009, 2009.
- Bulygina, N., McIntyre, N., and Wheeler, H. (2011): Bayesian conditioning of a rainfall-runoff model for predicting flows in ungauged catchments and under land use changes, *Water Resour. Res.*, 47, W02503, doi:10.1029/2010WR009240, 2011.
- Crozier, M.J., (2010). Deciphering the effect of climate change on landslide activity: a review. *Geomorphology* 124, 260–267. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.04.009>
- Dumas, P., Hallegatte, S., Quintana-Segui, P., and Martin, E. (2013): The influence of climate change on flood risks in France – first estimates and uncertainty analysis, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 809–821, doi:10.5194/nhess-13-809-2013, 2013.
- Forzieri G, Feyen L, Russo S, Voutsoukas M, Alfieri L, Outten S, Migliavacca M, Bianchi A, Rojas R, Cid A., (2016), Multi-hazard assessment in Europe under climate change. *Climatic Change* 137:105–119
- García-Ruiz, J.M., White, S., Martí-Bono, C., Valero, B., Errea, M.P., & Gómez Villar, A. (2004): La avenida del Barranco de Arás y los riesgos hidrológicos en el Pirineo Central español, in *Geografía física de Aragón. Aspectos generales y temáticos*, J.L. Peña, L.A. Longares y M. Sanchez (eds), Universidad de Zaragoza e Institucion Fernando el Catolico, Zaragoza, ISBN: 84-96214-29-X.
- Gariano, S. L. and Guzzetti, F. (2016), Landslides in a changing climate, *Earth-Science Reviews*, 162,227–252, <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.011>.
- Hall, J., Arheimer, B., Borga, M., Brázdil, R., Claps, P., Kiss, A., Kjeldsen, T. R., Kriaučiūnienė, J., Kundzewicz, Z. W., Lang, M., Llasat, M. C., MacDonald, N., McIntyre, N., Mediero, L., Merz, B., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Neuhold, C., Parajka, J., Perdigão, R. A. P., Plavcová, L., Rogger, M., Salinas, J. L., Sauquet, E., Schär, C., Szolgay, J., Viglione, A., Blöschl, G., (2014), Understanding Flood Regime Changes in Europe: A state of the art assessment. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18, 2735-2772.
- Huggel, S., Clague, J.J., Korup, O., (2012). Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains? *Earth Surf. Process. Landf.* 37, 77–91. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.2223>.
- Huggel, C., Gruber, S., Korup, O., (2013). Landslide hazards and climate change in high mountains. In: Shroder, J., James, L.A., Harden, C.P., Clague, J.J. (Eds.), *Treatise on Geomorphology of Human Disturbances, Climate Change, and Natural Hazards* 13. Academic Press, San Diego CA, USA, pp. 288–301.
- Hürlimann, M.; Copons, R.; Altimir, J. (2006): Detailed debris flow hazard assessment in Andorra: A multidisciplinary approach, *Geomorphology*, 78, 359-372.
- Jomelli, V. (2012). Alpine debris flows. *Science and Technology*, 4, 162-164
- Kääh, A., Reynolds, J. M., and Haeberli, W. (2005) Glacier and permafrost hazards in high mountains, in *Global Change and Mountain Regions: An Overview of Current Knowledge*, 225–234, 2005.
- Keiler, M. and Fuchs, S. (2016) Vulnerability and exposure to geomorphic hazards – some insights from mountain regions, in *Geomorphology and society*, edited by: Meadows, M. and Lin, J.-C., Springer, Tokyo, 165–180
- Krautblatter, M., Huggel, C., Deline, P., and Hasler, A.: Research Perspectives on Unstable High-alpine Bedrock Permafrost: Measurement, Modelling and Process Understanding, *Permafrost Periglac.*, 23, 80–88, <https://doi.org/10.1002/ppp.740>, 2012.
- López-Moreno, J. I., Begueria, S., and Garca-Ruiz, J. M., (2006), Trends in high flows in the central Spanish Pyrenees: response to climatic factors or to land use change?, *Hydrolog. Sci. J.*, 51, 1039–1050, doi:10.1623/hysj.51.6.1039,
- Llasat, M.C., (1993), Les inondations de 1940 en catalogne espagnole. Les inondations semblables pendant les cinquante années suivantes. *L'aiguat del 40. Inundacions catastròfiques i polítiques de prevenció a la Mediterrània nord-occidental*. Servei Geològic de Catalunya, 137-144. ISBN: 84-393-2642-4. D.L: B-29481-93. Barcelona, España.
- Llasat, M.C., M. Barriendos, Barrera, A., and Rigo, T., (2005), Floods in Catalonia (NE Spain) since the 14th century. Climatological and meteorological aspects from historical documentary sources and old instrumental records. *Journal of Hydrology. Special issue on Applications of palaeoflood hydrology and historical data in flood risk analysis*, 313, 32-47
- Llasat, M. C., M. Llasat-Botija, O. Petrucci, A.A. Pasqua, J. Rosselló, F. Vinet, L. Boissier, (2013). Towards a database on societal impact of Mediterranean floods in the framework of the HYMEX project. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 1–14

- Lorente, A., García-Ruiz, J.M., Beguería, S., Arnáez, J., (2002), Factors Explaining the Spatial Distribution of Hillslope Debris Flows. *Mt. Res. Dev.* 22, 32–39. doi:10.1659/0276
- Magnin, F., Josnin, J.-Y., Ravel, L., Pergaud, J., Pohl, B., and Deline, P. (2017) Modelling rock wall permafrost degradation in the Mont Blanc massif from the LIA to the end of the 21st century, *The Cryosphere*, 11, 1813–1834, <https://doi.org/10.5194/tc-11-1813-2017>
- Mediero, L., Santillán, D., Garrote, L., and Granados, A. (2014), Detection and attribution of trends in magnitude, frequency and timing of floods in Spain, *J. Hydrol.*, 517, 1072–1088, doi:10.1016/j.jhydrol.2014.06.040, 2014.
- Nicolle, P., R. Pushpalatha, C. Perrin, D. François, D. Thiéry, T. Mathevet, M. Le Lay, F. Besson, J.-M. Soubeyroux, C. Viel, F. Regimbeau, V. Andréassian, P. Maugis, B. Augéard, and E. Morice, (2014), Benchmarking hydrological models for low-flow simulation and forecasting on French catchments, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 2829–2857, doi:10.5194/hess-18-2829-2014
- Paranunzio, R., Laio, F., Chiarle, M., Nigrelli, G., Guzzetti, F., (2016). Climate anomalies associated to the occurrence of rockfalls at high-elevation in the Italian Alps. *Nat. Hazard Earth Sys. Sci. Discuss.* <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-2016-100>.
- Ravel, L., and Deline, P., (2011), Climate influence on rockfalls in high-Alpine steep rockwalls: the North side of the Aiguilles de Chamonix (Mont Blanc massif) since the end of the Little Ice Age. *The Holocene*, 21, 357–365, <http://dx.doi.org/10.1177/0959683610374887>
- Ravel, L., Deline, P., (2015). Rockfall hazard in the Mont Blanc massif increased by the current atmospheric warming. In: Lollino, G., Manconi, A., Clague, J., Shan, W., Chiarle, M. (Eds.), *Engineering Geology for Society and Territory Climate Change and Engineering Geology 1*. Springer International Publishing, pp. 425–428
- Renard, B., Lang, M., Bois, P., Dupeyrat, A., Mestre, O., Niel, H., Sauquet, E., Prudhomme, C., Parey, S., Paquet, E., Neppel, L., and Gailhard, J. (2008), Regional methods for trend detection: assessing field significance and regional consistency, *Water Resour. Res.*, 44, W08419, doi:10.1029/2007WR006268
- Rojas, R., Feyen, L., Bianchi, A., and Dosio, A. (2012), Assessment of future flood hazard in Europe using a large ensemble of biascorrected regional climate simulations, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 117, D17109, doi:10.1029/2012JD017461
- Sedan O., Desramaut N., Vandromme R., (2013) Logiciel ALICE version 7-Guide d'utilisateur, BRGM, RP-60004 (BRGM, Orléans, 2013).
- Senatore, A., Mendicino, G., Smiatek, G., Kunstmann, H., (2011). Regional climate change projections and hydrological impact analysis for a Mediterranean basin in Southern Italy. *J. Hydrol.* 399, 70–92. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.12.035>.
- Serrano, E., Morales, C., González-Trueba, J., & Martín, R. (2009). Cartografía del permafrost de montaña en los Pirineos españoles. *Finisterra. Revista Portuguesa de Geografía*, 87, 45–54.
- Serrano, E., Agudo, C., Delaloye, R., et Gonzales-Trueba, J.J. (2010), Permafrost distribution in the Posets massif, Central Pyrenees, *Norsk Geografisk Tidsskrift* 55(4), 245–252, DOI: 10.1080/00291950152746603
- Stoffel, M., Beniston, M., (2006). On the incidence of debris flows from the early Little Ice Age to a future greenhouse climate: a case study from the Swiss Alps. *Geophys. Res. Lett.* 33, L16404. <http://dx.doi.org/10.1029/2006GL026805>.
- Stoffel, M., Huggel, C., (2012). Effects of climate change on mass movements in mountain environments. *Prog. Phys. Geogr.* 36 (3), 421–439. <http://dx.doi.org/10.1177/0309133312441010>
- Turco, M., M.C. Llasat, S. Herrera, J.M. Gutierrez, (2017). Bias Correction and Downscaling future RCM Precipitation Projections using a MOS-Analog Technique. *Journal of Geophysic Research-Atmospheres* 122, doi: 10.1002/2016JD025724.
- Utasse, M., Jomelli, V., Leone, F., Grancher, D. Brunstein, D., Virmoux, C. (2016). Institutional and functional vulnerability assessment related to impacts of debris flows on roads in the French Alps. *International Journal of Disaster Risk Science*, 7, 186–197.
- Wood, J.L., Harrison, S. Turkington, T. A. R., Reinhardt, L. (2016), Landslides and synoptic weather trends in the European Alps, *Climatic Change*, 136:297–308, DOI 10.1007/s10584-016-1623-3

Comunicaciones a conferencias

- Baills A., Vandromme R., Desramaut N., Sedan O., Grandjean G, (2011) Changing patterns in climate-driven landslide hazard: an alpine test site. *The Second World Landslides Forum*, Oct 2011, Rome, Italy
- Llasat, M.C., Llasat-Botija, M, Cortés, M, Vinet, F., Quintana-Seguí, P., Gilabert, J., Del Moral, A., (2017). Coping with floods in a climate change framework in the Pyrenees: from the November 1982 event to the June 2013 event. *2nd International colloquium on climate change in mountain areas, PYRADAPT 2017*.
- Rico, I., Magnin F, López-Moreno JI, Alonso E, Revuelto J, Serrano E. 2017. First evidence of permafrost occurrence in a steep rock wall in the Pyrenees: The Vignemale North Face. In: *Ambientes Periglaciares: avances de su estudio, valoración patrimonial y riesgos asociados*. Ed. Universidad de Oviedo, 282pp. Oviedo.

Colaboradores

Comité técnico y Comité ejecutivo de la CTP



Comité coordinación y Socios del proyecto OPCC2



Con el apoyo de



Este informe se ha realizado en el marco del proyecto OPCC2 por iniciativa de la Comunidad de Trabajo de los Pirineos. El proyecto OPCC2 está asociado a los proyectos CLIMPY, FLORAPYR, REPLIM, CANOPEE y PIRAGUA. Todos estos proyectos están cofinanciados por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional, FEDER a través del programa POCTEFA 2014-2020.

Descarga el informe completo y el resumen ejecutivo en ES, FR, CAT o EN en el portal de información del Observatorio Pirenaico del Cambio Climático: <https://opcc-ctp.org/>

