



**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE
INFRAESTRUCTURAS VERDES COMO MEDIDA DE ADAPTACIÓN AL
CAMBIO CLIMÁTICO EN ZONAS DE MONTAÑA DE LA PENÍNSULA
IBÉRICA (PROYECTO IVERCAM)**

INFORME FINAL DE PROYECTO

IH cantabria



ÍNDICE



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES.....	1
1.1. Evolución del paisaje en áreas de montaña	2
1.2. Cambios en los regímenes hidrológicos y climáticos	3
1.3. Las Redes de Infraestructura Verde (GINs) y el funcionamiento ecosistémico	4
2. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	9
3. METODOLOGÍA INTEGRADA PARA EL DISEÑO DE GINs	10
4. MODELIZACIÓN DE CAMBIOS EN EL PAISAJE	12
4.1. Desarrollo de bases de datos	13
4.1.1. Puntos de verdad terreno: entrenamiento de modelos	13
4.1.2. Variables ambientales e imagen de satélite	15
4.2. Cambio en la ocupación del suelo	17
4.2.1. Algoritmos de modelado.....	17
4.2.2. Dinámica de los patrones de ocupación del suelo.	18
4.3. Escenarios futuros.....	26
5. MODELIZACIÓN HIDROCLIMÁTICA.....	33
5.1. Descripción del modelo TETIS v9.....	33
5.1.1. Simulación hidrológica	34
5.1.2. Simulación de sedimentos	38
5.1.3. Calibración del modelo	38
5.2. Datos de partida	39
5.2.1. Clima.....	39
5.2.2. Aforos	44
5.2.3. Cartografía	45
5.3. Fases del modelado.....	47
5.4. Resultados	49
5.4.1. Calibración de los parámetros	49
5.4.2. Rendimiento del modelo	50
5.4.3. Hidrología	53
5.4.4. Erosión	62
6. LA RED DE INFRAESTRUCTURA VERDE (GIN).....	65
6.1. Propuesta inicial derivada del modelado	68
6.2. Modelado de servicios ecosistémicos.....	75
6.3. Consultas a expertos y validación del modelado de servicios	77
6.4. Propuesta final integrada	91
6.5. La red de Infraestructura Verde en el contexto de la dinámica hidrológica de los sistemas de cuenca analizados	98
6.6. Transferencia y difusión de los resultados del proyecto.....	99
7. CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE FUTURO	103
7.1. Conclusiones generales del proyecto.....	103
7.2. Trabajos futuros en el corto y medio plazo.....	105
8. AGRADECIMIENTOS	107
9. BIBLIOGRAFÍA	108
ANEJO I. INDICADORES DE CUMPLIMIENTO Y FUENTES DE VERIFICACIÓN	AI.1



MEMORIA



1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Durante las últimas décadas, los cambios en el clima y la cobertura del suelo han provocado una pérdida de biodiversidad sin precedentes en la historia de la humanidad (cambio global). El aumento de la fragmentación forestal, la eliminación de sistemas naturales por infraestructuras antrópicas, las prácticas agrícolas, así como incendios intencionados, han contribuido a la generación de mosaicos paisajísticos degradados, con manchas de hábitat natural aisladas y no interconectadas, alterando la función de los paisajes desde el punto de vista de la distribución de especies y los flujos de materia y energía que se producen entre los diferentes ecosistemas.

De entre todos los ecosistemas terrestres, las montañas son enclaves que albergan una alta biodiversidad y proveen numerosos servicios ecosistémicos a las sociedades humanas. Concentran gran parte de los endemismos peninsulares, su funcionamiento condiciona la dinámica de inundaciones de cuenca al tratarse de las áreas de recarga de la misma y conservan formas de gestión tradicional de bosques, pastos, aguas, ganadería y agricultura, importantes desde el punto de vista humano por su valor cultural y de estructuración del paisaje. Por otro lado, las zonas de montaña son altamente sensibles a los efectos del cambio climático y, según el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC), han sido señaladas por todas las evaluaciones de impacto como las áreas más vulnerables al mismo y ya se han detectado algunos cambios en la distribución altitudinal de comunidades vegetales y animales propias de estos ambientes. Por ello, y dada la importancia de los ecosistemas de montaña de cara a la protección de la biodiversidad y de los servicios básicos que proveen sobre otros territorios, se hace necesario realizar una correcta planificación de las acciones de adaptación a los efectos del cambio climático. En este sentido, la implementación de redes de infraestructura verde en estas áreas emerge como una de las acciones prioritarias desde el punto de vista de la adaptación, habiendo sido aconsejada por la Estrategia de la Unión Europea en Infraestructuras Verdes debido a las propiedades de los sistemas montañosos como zonas de aislamiento-conectividad, su continuidad espacial e influencia en las dinámicas de cuenca.

La iniciativa "Infraestructura Verde" de la Unión Europea (2013) ha sido diseñada estableciendo un marco en el que llevar a cabo una gestión efectiva del territorio basada en la conservación y restauración de una red espacios destinada a la mejora de la biodiversidad y de los servicios ecosistémicos que aportan (calidad y disponibilidad de agua, control y mitigación de inundaciones, reducción de sedimentos, secuestro de carbono, provisión de recursos acuáticos...). En este contexto, IVERCAM busca desarrollar una metodología que facilite el diseño y la implementación de infraestructuras verdes en zonas de montaña de cara a la adaptación al cambio climático, teniendo como objetivos la conservación de la biodiversidad y la mejora del funcionamiento hidrológico de la cuenca. IVERCAM se ha desarrollado en 3 PPNN de montaña (Picos de Europa, Sierra de Guadarrama y Sierra Nevada) lo que ha permitido explorar el efecto diferencial del cambio climático y la adopción de las soluciones más efectivas en cada sistema montañoso (Cordillera Cantábrica, Sistema Central y Sistema Bético, respectivamente) y, por ende, en tres dominios climáticos de marcados contrastes.

1.1. Evolución del paisaje en áreas de montaña

El cambio global es el conjunto de cambios ambientales inducidos/acelerados por actividades humanas tales que, aunque ejercidas local o regionalmente, tienen efectos que trascienden este ámbito para afectar el funcionamiento global del sistema Tierra. Se trata de un fenómeno surgido como consecuencia de múltiples interacciones y procesos locales acumulativos que adquieren alcance global por la adición de fenómenos semejantes en diferentes partes del mundo (Figura 1).

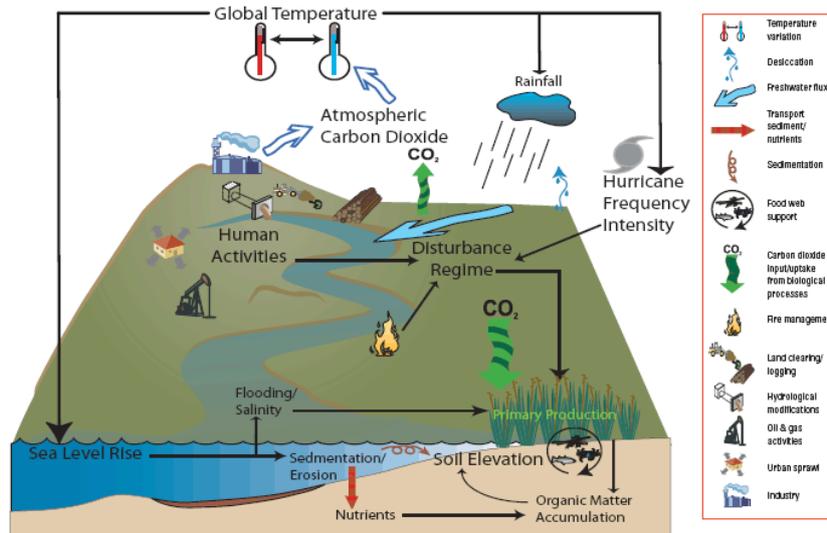


Figura 1. Modelo conceptual de los componentes y procesos locales acumulativos del cambio global. Fuente: University of Maryland, Center for Environmental Sciences.

La intensificación de las actividades económicas destinadas a la consecución de bienes y servicios del medio, ligada a la globalización económica y tecnológica y al aumento de la población mundial, se convierte en la macrofuerza motriz del sistema. Los impactos ambientales y sociales causados por estos cambios son muy variados: alteraciones de los ciclos biogeoquímicos y del clima, cambios de usos del suelo y desertificación, así como una alarmante pérdida de biodiversidad y un incremento de las invasiones biológicas de especies, que se ven favorecidas por las nuevas condiciones (IPCC 2007).

De todos los procesos integrados en el cambio global, los cambios de usos y tipos de ocupación del suelo o cambios en el paisaje (Lambin and Geist 2006) están considerados por muchos autores como la principal causa de pérdida y degradación de los hábitats naturales (Figura 2), originando con ello el declive de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos generados (Foley et al. 2005). Representan el factor más importante en relación a las afecciones producidas sobre los recursos naturales (Hunsaker and Levine 1995), el que más intensamente interactúa con los demás elementos (Vitousek et al. 1997) y el que producirá mayores y más numerosos impactos sobre el Planeta a corto y medio plazo (Sala et al. 2000). Estos impactos modifican la estructura espacial y el funcionamiento de los paisajes a escala local, regional y global de tal modo que, hoy en día, la gran mayoría de los ecosistemas planetarios presentan cierto grado de degradación o alteración atribuible a acciones humanas. Del estudio de la magnitud de estos cambios en el tiempo, así como de la evaluación y comprensión de los factores que las regulan, dependerá en buena medida nuestra capacidad de reacción futura.

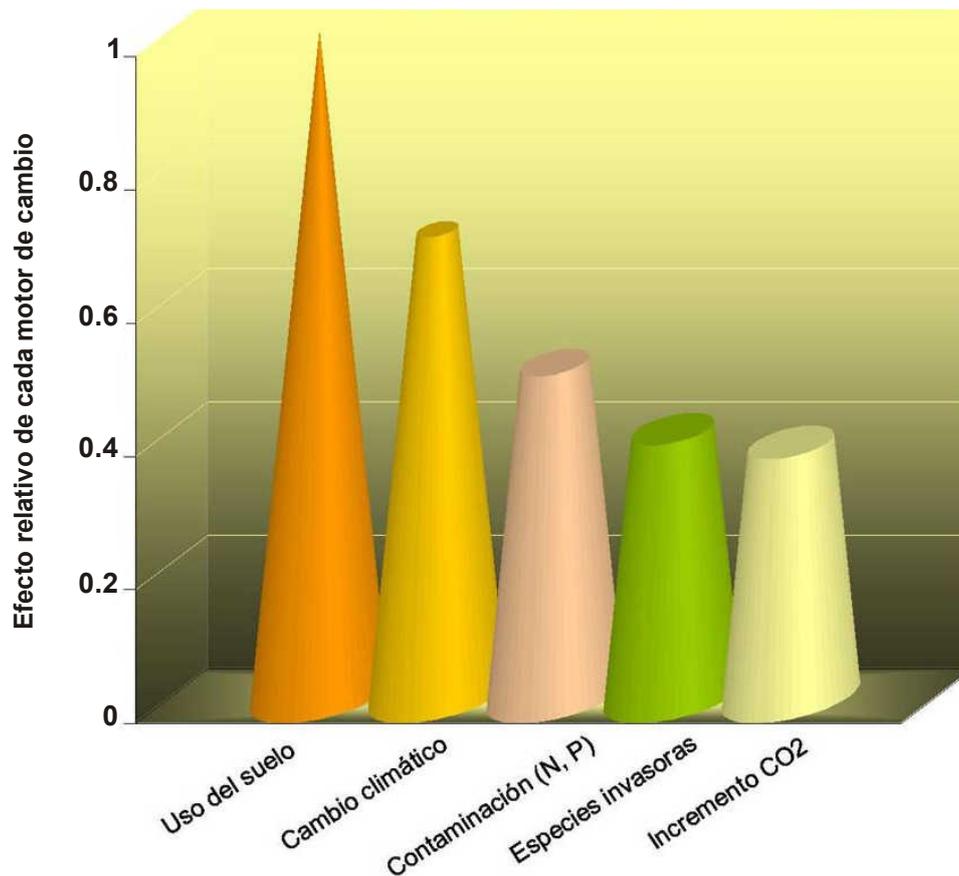


Figura 2. Los cambios de usos del suelo son la principal causa de pérdida de biodiversidad en ecosistemas Mediterráneos.

Las áreas de montaña, de mayor fragilidad que otros sistemas planetarios debido a las condiciones extremas que los gobiernan, su distribución a lo largo de gradientes cambiantes y generalmente limítrofes entre pisos bioclimáticos, presentan una mayor complejidad en la estructura y dinámica paisajísticas cuyo conocimiento se hace necesario para definir la implicación de ambas en la función que estas áreas ejercen en el continuo territorial.

1.2. Cambios en los regímenes hidrológicos y climáticos

Las montañas abastecen a más de la mitad de la población mundial en agua para beber, para el riego agrícola, proveen agua suficiente para la agricultura, la industria, la producción de alimentos y de energía. El 23% de la superficie montañosa es esencial para el aprovisionamiento en agua tierras abajo y otro 30% contribuyen en parte a su abastecimiento. Cuando los ecosistemas de montaña se encuentran en buen estado, contribuyen además a la regulación del clima, la calidad del aire, de los flujos de agua y brindan protección contra los riesgos naturales y los impactos de los eventos naturales extremos. Las montañas se encuentran entre las regiones más sensibles a los cambios climáticos. Sus glaciares y ecosistemas son indicadores fiables de este fenómeno. Todos estos beneficios se pueden abordar bajo el marco conceptual de servicios ecosistémicos: se trata de un enfoque estandarizado para clasificar y cuantificar los recursos naturales de tal forma que sean significativos tanto en términos ecológicos como socio-económicos.

Son numerosas las evidencias científicas que han demostrado un incremento de la temperatura (Fig. 4) y una mayor variabilidad estacional de las precipitaciones durante las últimas décadas en estas regiones, así como de forma global en todo el planeta (IPCC 2007). El cambio climático es, sin duda, un fenómeno que ha trascendido el ámbito de la investigación científica, percolando en la sociedad. Sus efectos son muy diversos (alteración de los sistemas ecológicos a todas las escalas y de los fenómenos meteorológicos), resultando atribuibles en buena medida a causas humanas, entre las que destacan las emisiones de gases invernadero (fundamentalmente dióxido de carbono y metano) que retienen parte del calor emitido por la superficie terrestre (Zhang and Lu 2009).

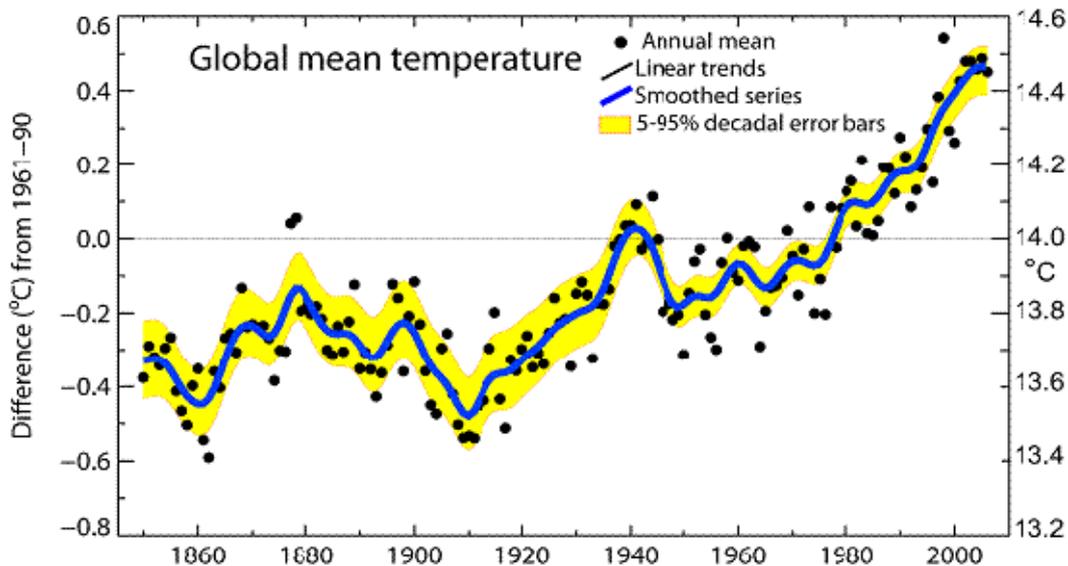


Figura 3. Los cambios de usos del suelo son la principal causa de pérdida de biodiversidad en ecosistemas Mediterráneos. A partir de Sala et al. (2000) y Valladares (2004b).

Dentro del contexto europeo, España es uno de los países más vulnerables al cambio climático y global, dada su posición geográfica estratégica en el límite de los dominios Eurosiberiano y Mediterráneo, su complejidad topográfica y litológica y la fragilidad de sus paisajes (Myers et al. 2000). Dado que algunas regiones soportan unas condiciones de aridez semejantes a las existentes en áreas subdesérticas del continente africano, cualquier alteración de la cubierta vegetal o del régimen hídrico a consecuencia, por ejemplo, de incendios forestales, roturación de montes u ocupación del territorio para usos residenciales o industriales puede conducir a procesos de erosión irreversibles, pérdida de fertilidad en zonas agrícolas o sobreexplotación de los recursos hídricos. Como consecuencia, el potencial productivo de los ecosistemas puede resultar gravemente dañado, afectando a los valores socioeconómicos dependientes (Zavala and Burkey 1997).

1.3. Las Redes de Infraestructura Verde (GINs) y el funcionamiento ecosistémico

La intensa intervención humana es una característica propia de la mayoría de los paisajes mediterráneos. La acción antrópica durante los últimos milenios ha sido, sin duda, un elemento crítico determinante en los cambios de las especies dominantes, modificando la estructura y funcionamiento de muchos ecosistemas terrestres (Valladares 2004). En un

marco temporal más reciente, en la España de comienzos del siglo XX, se iniciaron grandes programas de repoblación forestal productivistas que continuaron, en menor medida, bajo el esquema de la Política Agraria Comunitaria (PAC) (Ritson and Harvey 1997). Para restablecer el equilibrio entre la producción y la capacidad de mercado y hacer posible la presencia de la agricultura europea en los mercados mundiales (garantizando a la vez un nivel de renta equitativo para los agricultores y el respeto por el medio ambiente), la reforma de la PAC planteó como objetivos fundamentales una mayor eficacia y competitividad en las explotaciones (Reglamento CEE 2328/91), así como una reducción progresiva de los sectores excedentarios. El abandono de los campos en los suelos más pobres, la menor o nula carga ganadera y el cese de las actividades extractivas (madera, leña, carbón, etc.) contribuyeron decisivamente a la expansión del bosque (Pueyo and Beguería 2007) (Figura 4). Como consecuencia de ello, se ha producido un incremento notable de la diversidad florística y faunística, una mejora en la calidad del suelo y del ciclo hidrológico y una reducción importante de la erosión superficial (Ahearn et al. 2005). Esto ha ocurrido, al menos con mayor intensidad, en áreas marginales submediterráneas menos secas mientras que, en otras áreas más áridas, el sobrepastoreo y la degradación ambiental generalizada, en combinación con ciclos climáticos poco favorables, han dificultado considerablemente la recuperación espontánea de la vegetación (Álvarez-Martínez et al. 2014).

La expansión del bosque se ha traducido en la generación de un escenario nuevo en las zonas de montaña, concretamente en las cuencas de cabecera de los ríos y latitudes más altas. El efecto de la expansión y maduración de estas masas forestales sobre la calidad del agua es tal que, en cuencas forestadas, un 15-30% del agua de lluvia queda retenida por la vegetación y es devuelta a la atmósfera por la elevada evapotranspiración e interceptación (Baker 2003). Asimismo, se reduce la erosión y la pérdida de suelo, redundando en una mejora en la calidad del agua de los arroyos. La gestión del agua en nuestro país ha supuesto, a lo largo de su historia, un asunto complejo y de gran trascendencia social y económica. El carácter torrencial de nuestros ríos y una climatología con fuertes contrastes pluviométricos y elevada evapotranspiración, junto a la heterogeneidad de su aprovechamiento en cantidad y destino, vienen provocando periódicamente episodios de escasez o dramáticas pérdidas de calidad en determinadas regiones y épocas del año (Figura 5). En este contexto ha de aplicarse la Directiva Marco del Agua (DMA), que requiere a los Estados Miembros un "buen estado ecológico y químico" de todas sus aguas continentales. Esta normativa europea exige el desarrollo de planes de gestión de cuencas, así como la toma de decisiones encaminadas a la consecución de sus objetivos. Por ello, el papel de la gestión del territorio es fundamental. Los procesos que gobiernan la dinámica de los paisajes, así como los factores determinantes de los cambios de usos del suelo, deben ser analizados y relacionados con la cantidad y calidad de los recursos hídricos, de cara a gestionar adecuadamente el conjunto a nivel de cuenca.

Este conjunto de procesos, naturales y antrópicos, que implican una renaturalización de los ecosistemas hacia formas más resilientes y generadoras de bienes y servicios basados en la mejora de la función ecosistémica conforman lo que llamamos Redes de Infraestructura Verde (GINs por sus siglas en inglés).



Figura 4. Los cambios de ocupación del suelo obedecen a las interacciones de un conjunto de fuerzas naturales y antrópicas que provocan presiones divergentes sobre el territorio.

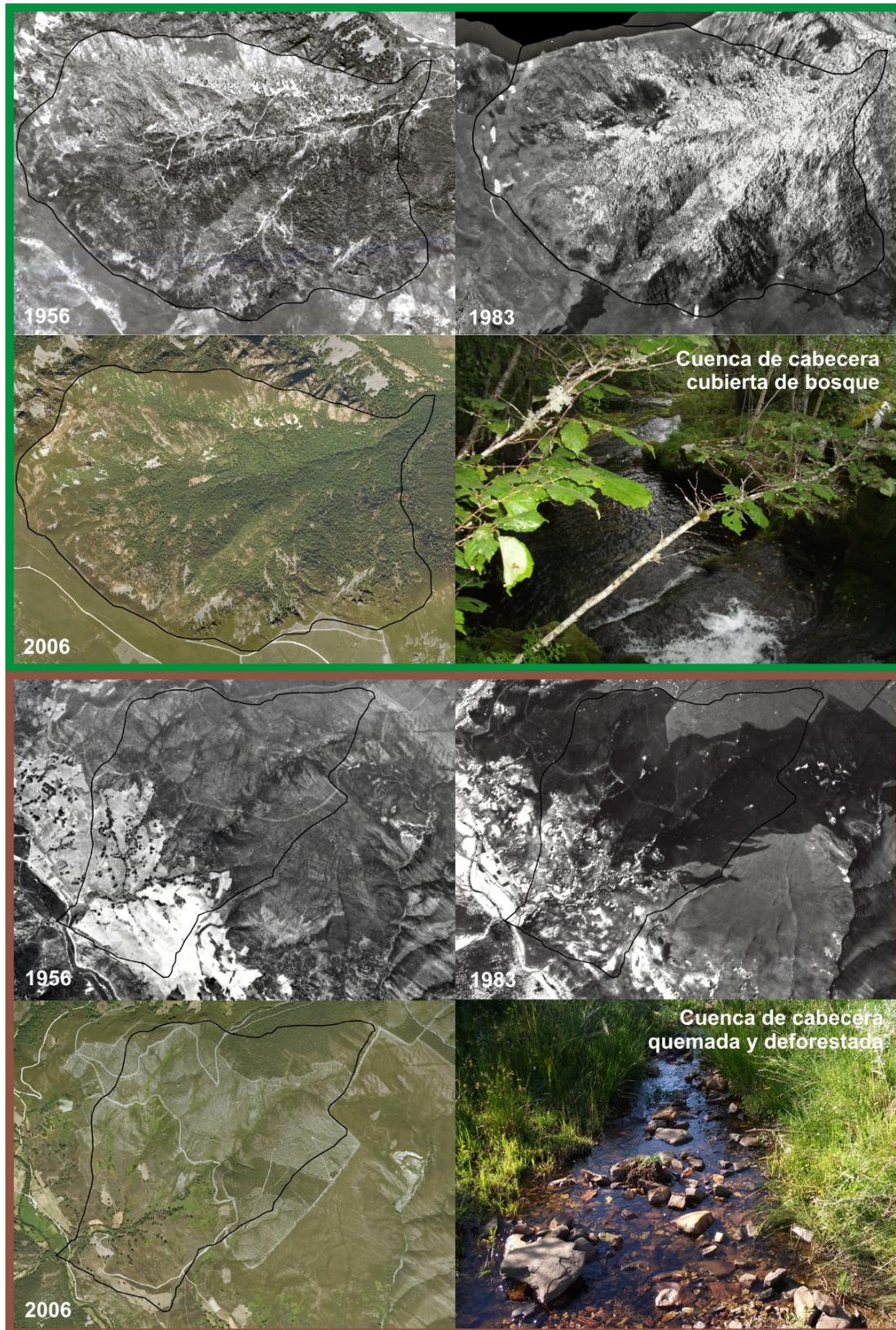


Figura 5. El tipo de ocupación del suelo se relaciona con los recursos hídricos en términos de cantidad y calidad del agua de los cauces receptores. Los bosques regulan la escorrentía, reducen la erosión y mantienen caudales mayores y más regulares en la época estival.

En este contexto, los Parques Nacionales son una valiosa aportación a la conservación de la naturaleza que constituyen una Red orientada a configurar un modelo de gestión conservacionista en donde se presta atención singular a la riqueza en diversidad biológica y a la evolución conjunta de los sistemas naturales y culturales. Son un ejemplo concreto de cómo articular la conservación "in situ". Desde esta óptica no son un fin sino un medio demostrativo en donde la gestión en mosaico determine un modelo amigable de gestión adaptativa que debiera, poco a poco, contribuir a conformar una forma de hacer conservación. La evolución y exigencias de nuestra sociedad implica avanzar hacia una formulación conceptual avanzada en donde la integridad ecológica sea el resultado de una vinculación a un territorio diversificado y altamente interconectado.

La adaptación basada en ecosistemas crea oportunidades para disminuir la vulnerabilidad –la cual afecta no solo a los habitantes de las montañas, sino también a los millones de personas que dependen del agua y de los servicios ambientales que brindan los ecosistemas de montaña– y para identificar y evaluar las capacidades de las comunidades para adaptarse al cambio climático. El enfoque de "pago por servicios ambientales" significa remunerar a las comunidades de montaña para apoyarlos en el mantenimiento de los ecosistemas los cuales proporcionarán servicios en el largo plazo, brindando beneficios generalizados.

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

En este contexto, el objetivo general de IVERCAM ha consistido en desarrollar un conjunto de herramientas que permitan planificar la implementación de infraestructuras verdes para minimizar los riesgos del cambio climático en zonas de montaña de la Península Ibérica, buscando alcanzar una estructura de paisaje óptima basada en la conservación de la biodiversidad y provisión de servicios ecosistémicos. Para ello, IVERCAM ha incorporado las últimas potencialidades en materia de caracterización de biodiversidad, modelado hidrológico, aplicación de escenarios de cambio y valoración de servicios ecosistémicos, así como la implicación de agentes asociados a la gestión de estos espacios, permitiendo:

- (1) Predecir la evolución del paisaje y su biodiversidad en base al contexto actual de cambio climático en las 3 zonas de montaña seleccionadas;
- (2) Determinar los efectos del cambio climático sobre la provisión de servicios ecosistémicos en las 3 zonas de montaña seleccionadas;
- (3) Identificar, diseñar y promover la planificación de soluciones ambientales basadas en infraestructura verde que permitan optimizar la estructura de paisaje para mitigar los efectos del cambio climático, conservando la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos en las 3 zonas de montaña seleccionadas;
- (4) Integrar la implementación de infraestructuras verdes en los instrumentos de gestión de los espacios naturales protegidos incluidos en las 3 zonas de montaña seleccionadas y
- (5) Divulgar el proyecto y sus resultados más relevantes.

3. METODOLOGÍA INTEGRADA PARA EL DISEÑO DE GINS

IVERCAM ha aplicado una metodología integradora de los cambios en los patrones y procesos del paisaje y la respuesta hidrológica a nivel de cuenca en 3 Parques Naturales de montaña de la Península Ibérica: PN de los Picos de Europa, PN de la Sierra de Guadarrama y PPNN de Sierra Nevada. En conjunto, estos sistemas conforman 3 dominios montañosos peninsulares (Cordillera Cantábrica, Sistema Central y Sierra Nevada) con grandes diferencias en sus patrones climáticos dominantes. Su estudio ha resultado, por lo tanto, muy interesante en materia adaptativa frente al cambio climático. El gradiente latitudinal norte-sur (Figura 6) en torno al cual se encuentran distribuidos estos PPNN ha permitido analizar las respuestas a eventos climáticos actuales y futuros en 3 escenarios espaciales diferentes, pudiendo explorar el efecto diferencial del cambio climático sobre estos espacios y generar soluciones de infraestructuras verdes adaptadas al mismo.

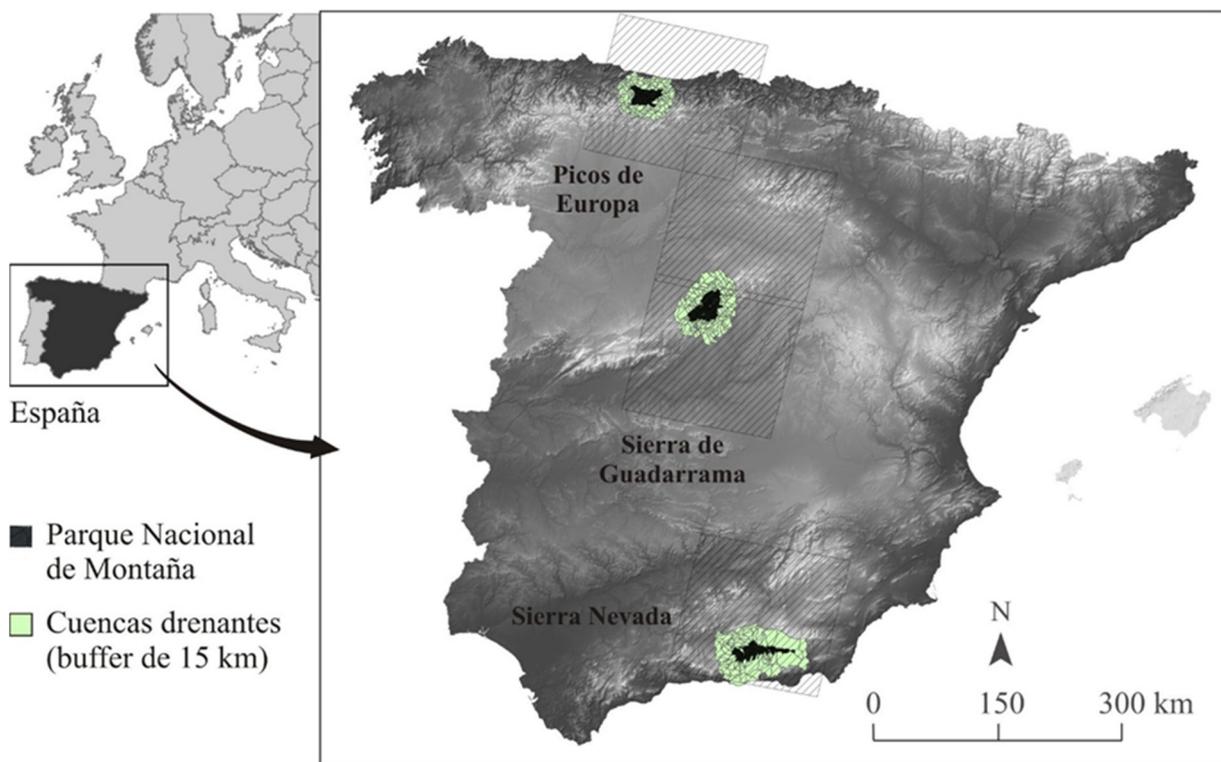


Figura 6. Área de estudio

IVERCAM ha desarrollado una metodología integradora que incorpora las últimas potencialidades en materia de caracterización de biodiversidad, modelado hidrológico, aplicación de escenarios de cambio y valoración de servicios ecosistémicos, así como la implicación de agentes asociados a la gestión de estos espacios, permitiendo establecer relaciones causa efecto entre los diferentes factores (paisajístico, climático, hidrológico y social) de cara a evaluar el efecto del cambio climático y global sobre la provisión de bienes y servicios ecosistémicos. Se han aplicado dos métodos de modelado:

1) En primer lugar, se ha analizado la evolución del paisaje y su biodiversidad durante los últimos 30 años usando una serie temporal de imágenes del satélite Landsat 5 TM y Landsat 8 en las 3 zonas de montaña seleccionadas. A continuación, se ha utilizado información climática (estaciones termopluviométricas) e hidrológica (estaciones de aforo) para reproducir ciertos aspectos de la dinámica fluvial de los ríos principales de las 3 zonas de montaña seleccionadas.

2) A continuación, se ha utilizado la plataforma NetMap (Benda et al. 2009) que proporciona capacidades de análisis ambiental de vanguardia. NetMap crea cuencas hidrográficas virtuales y redes fluviales inteligentes en entorno GIS que brindan apoyo a la toma de decisiones en silvicultura, pesca, restauración, manejo de ribera, conservación, planificación pre y post incendio y cambio climático. Finalmente, la información de cambios en el paisaje y respuesta hidrológica proporcionada por los modelos y NetMap es integrada para conocer las relaciones causa efecto y determinar la disposición óptima de las redes de infraestructura verde en el continuo territorial.

El uso de esta metodología, de este modo, ha permitido identificar, diseñar y promover la planificación de soluciones ambientales basadas en infraestructura verde que permitan optimizar la estructura de paisaje para mitigar los efectos del cambio climático, conservando la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos. Mediante la reunión con agentes implicados en la gestión de los espacios, la metodología permite integrar, además, la implementación de estas infraestructuras en los instrumentos de gestión. Los administradores de recursos deben tratar cada vez más con el uso del suelo y los planes de conservación aplicados a grandes escalas espaciales (cuencas hidrográficas, paisajes, estados, regiones) involucrando a todas las partes interesadas. Muchas organizaciones públicas y privadas tienen información, preguntas, necesidades de análisis y objetivos similares, lo que está motivando el desarrollo de bases de datos de cuencas hidrográficas y sistemas de análisis de estructuras y funciones comunes en grandes áreas geográficas de cara a comprender los patrones y procesos del medio natural de forma integrada para el manejo óptimo de bosques, peces de agua dulce, vida silvestre y calidad y suministro de agua.

4. MODELIZACIÓN DE CAMBIOS EN EL PAISAJE

Las condiciones ecológicas de un área o región y sus cambios a lo largo del tiempo, bajo ciertos condicionantes medioambientales y humanos, determinan la presencia-ausencia de las especies, poblaciones y comunidades en el continuo territorial. Estas comunidades pueden ser consideradas como un proxy de los hábitats tras la correcta asignación de tipologías entre sistemas de clasificación de la vegetación. Bajo esta premisa, IVERCAM ha aplicado una metodología basada en la modelización de las relaciones que se establecen entre la distribución de las comunidades vegetales (puntos de ocurrencia), las condiciones ambientales que caracterizan dichas zonas, las interacciones bióticas y las perturbaciones humanas (variables predictoras) (Álvarez-Martínez et al. 2018). La metodología permite obtener diferentes productos cartográficos aplicables, de forma independiente o conjunta, al diagnóstico y planificación de los espacios de interés.

Hasta hace solo algunas décadas, la complejidad del estudio de los sistemas ecológicos ha sido abordada desde su simplificación y homogeneización, analizando de forma local fragmentos de comunidades/ecosistemas, independientemente de su contexto espacial. Sin embargo, las herramientas disponibles actualmente (SIG, teledetección, técnicas de análisis y modelado de datos) permiten afrontar el estudio de cualquier fragmento de la Biosfera, considerando de forma explícita la heterogeneidad y dinámica del territorio para diseñar estrategias de conservación más realistas e integradoras. La evolución de la teoría ecológica y el reconocimiento de los sistemas ecológicos como mosaicos heterogéneos y escalo-dependientes, fluctuantes en estado de "no-equilibrio", escenario de procesos evolutivos y de colonización-extinción e indisociables del hombre, ha hecho replantear además esta visión estática de la conservación de la naturaleza. En la actualidad se reconoce que el conocimiento de la dinámica del territorio, uso del suelo y función de los paisajes y ecosistemas es fundamental para la supervivencia de las poblaciones y la recolonización de los hábitats perturbados.

Por otro lado, el análisis de los usos y tipos de ocupación del suelo ha sido históricamente realizado por parte de la Administración mediante encuestas o muestreos in situ (Peña 2001). En la actualidad, el procesado de imágenes y las técnicas SIG permiten evaluar visual y analíticamente los cambios temporales acontecidos en el territorio de forma semiautomática y mucho más precisa. Además, debido a la gran cantidad de información y técnicas disponibles, es posible adaptar los análisis a escalas temporales y espaciales deseadas, como una escala anual para el seguimiento de la recuperación vegetal post-incendio, o escala espacial detallada para la monitorización, a lo largo de décadas, de la dinámica sucesional de los bosques.

La teledetección (traducción del término inglés remote sensing) es una técnica que permite estudiar la superficie terrestre a partir de imágenes de satélite, obtenidas por sensores localizados en la atmósfera sobre plataformas espaciales (por ej. Landsat, Spot, Sentinel) otros sensores activos como el LiDAR, que nos da información relativa a la estructura (desarrollo vertical) de la vegetación terrestre. La teledetección engloba los procesos que permiten obtener una imagen, su posterior tratamiento y la generación de productos derivados (Chuvienco 2000). En general, constituye una fuente de datos de gran interés en los estudios de paisaje dada su capacidad para seguir procesos dinámicos (Rogan et al. 2002).

De acuerdo con (Lillesand et al. 2008), la teledetección ofrece una serie de ventajas frente a otros medios de observación más convencionales, incluyendo cobertura global y periódica de la superficie terrestre, visión panorámica, información sobre regiones no visibles del espectro y formato digital de los datos. De entre sus aplicaciones, la caracterización de la cubierta vegetal y la dinámica de cambios en la ocupación y el uso del suelo es una de las ramas más desarrolladas. El resultado final de la metodología de modelado es una cartografía actual de la superficie terrestre con representación individual de cada tipología de interés en el territorio, lo que determina su rango de distribución, que identifica zonas de alta probabilidad de ocurrencia de cada tipología cuando ésta se expresa en el continuo territorial compitiendo con el resto de tipologías modeladas.

4.1. Desarrollo de bases de datos

El desarrollo de una cartografía espacialmente explícita de las áreas de ocupación actual y potencial de la ocupación del suelo implica el desarrollo de una serie de bases de datos relativas a información de verdad terreno, necesaria para el entrenamiento supervisado de los modelos, variables predictoras espacialmente explícitas (factores ambientales limitantes, imagen de satélite y sensores remotos activos como el LiDAR) y una serie de algoritmos de modelado que se encargarán de ensamblar puntos de entrenamientos con variables predictoras para generar las predicciones continuas relativas a las áreas de distribución de las tipologías de ocupación seleccionadas.

4.1.1. Puntos de verdad terreno: entrenamiento de modelos

Para el desarrollo de los modelos de ocupación del suelo se hace necesario, en primer lugar, generar una base de datos de ocurrencia de las tipologías de ocupación (clases de vegetación y otras) correspondientes al área de interés, procedentes de cartografías desarrolladas por organismos públicos o privados, consultas a expertos y trabajos de campo. En el caso de utilización de mapas vegetación, se han seleccionado puntos de ocurrencia en zonas centrales de polígonos o manchas, correspondientes a representaciones puras de cada una de las clases que se desean cartografiar.

En IVERCAM se ha recogido información de 9 unidades de paisaje a través de un total de 90604 puntos que han sido validados mediante el uso de revisión de experto sobre ortofoto a escala de detalle, Google Street View y visitas de campo parciales. En Picos se seleccionaron 18204 puntos, en Guadarrama 9892 y en Sierra Nevada 10501. Los puntos se corresponden con los centroides de los polígonos de los mapas de vegetación utilizados; en teselas de gran tamaño, se seleccionó un punto adicional por cada 5 hectáreas de superficie, de forma aproximada. Aquellas zonas más fragmentadas y heterogéneas serán, por lo tanto, muestreadas por una mayor densidad de puntos de entrenamiento, mientras que áreas más homogéneas presentarán un número menor, como puede verse en la Figura 7. que se detallan a continuación. La densidad de puntos depende también del detalle del mapa de vegetación seleccionado como base informativa, de tal modo que mapas más detallados, como el correspondiente al PPNN de Picos de Europa, creado a escala 1:1000, permite seleccionar el centroide de un gran número de teselas, aumentando la densidad de los puntos de entrenamiento.

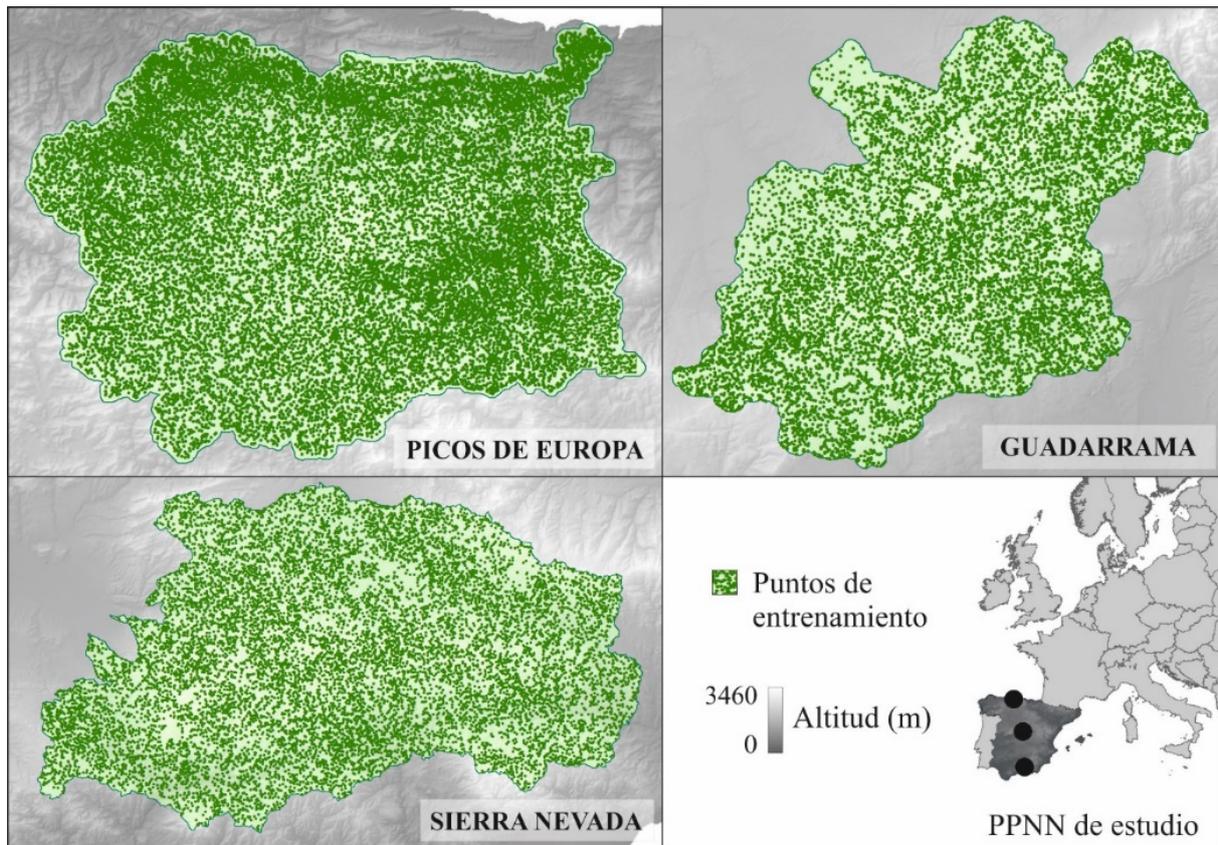


Figura 7. Puntos de entrenamiento o verdad terreno utilizados para el desarrollo de los modelos de ocupación del suelo en el proyecto IVERCAM.

Una vez seleccionados los puntos y en base a las variables predictoras disponibles, descritas en el siguiente apartado, se aplicaron criterios de reducción de autocorrelación en cada caso para evitar efectos de sobremuestreo y se validó la correcta asignación de tipologías de ocupación del suelo mediante extracción de valores de estas variables a los puntos y análisis multivariantes de filtrado de información. Esta extracción de valores permite, por un lado, excluir puntos aberrantes de la base de datos de entrenamiento, y constituye el paso principal para el desarrollo de los modelos de ocupación del suelo, por otro.

4.1.2. Variables ambientales e imagen de satélite

Como se ha señalado, se ha construido una base de datos multivariante relativa a los 3 PPNN de estudio. Esta base de datos digital incluye, en primer lugar, variables ambientales abióticas relativas al nicho ecológico de las comunidades vegetales que conforman el paisaje: topografía, clima, geología/litología y propiedades del suelo. Estas variables representan factores abióticos limitantes que condicionan la presencia/ausencia de especies y comunidades. La Figura 8 muestran un ejemplo de alguna de las variables de cada familia utilizadas en el proceso de modelado del PPNN de Picos de Europa y alrededores.

En segundo lugar, se han descargado de los servidores de la NASA y la ESA series temporales de imágenes de satélite multiespectrales (sensor Landsat 5TM y 8 OLI), con una cobertura temporal desde 1985 hasta la actualidad, imágenes actuales (año 2017) del satélite Sentinel 2A con resolución temporal (una imagen de primavera tardía, abril, y otra de verano, agosto, para cada PPNN) e información LiDAR actual procedente del CNIG (Gobierno de España). Estas variables procedentes de teledetección permiten una realización del nicho potencial de las comunidades vegetales, y en general de cualquier tipología de ocupación del suelo, integrando información sobre las interacciones bióticas y las perturbaciones humanas en el pasado y presente mediante la observación remota de la ocupación del suelo y su dinámica temporal. El uso de información satelital con cobertura temporal en el caso de las imágenes Sentinel 2A permite incluir aspectos fenológicos en la discriminación de cubiertas, lo que proporciona al proceso de modelado una mayor capacidad de discriminación durante la fase de asignación de categorías.

Existen multitud de misiones espaciales que han generado datos válidos para diversas aplicaciones ambientales, entre las que destacan los satélites Landsat. Los datos proporcionados por estas imágenes han sido utilizados muy ampliamente en diversos campos y áreas geográficas. Por ejemplo, se han empleado en estudios de caracterización de riesgo de incendio, identificación de zonas quemadas y análisis de los efectos del fuego en la vegetación (Díaz-Delgado y Pons, 2001; Díaz-Delgado et al., 2002; Lozano et al., 2007, 2008). Fueron desarrollados en Estados Unidos y son la base del programa espacial comercial de observación de la Tierra que más tiempo lleva funcionando. Desde que en 1972 se lanzara al espacio el primer satélite, este programa ha puesto a disposición de los usuarios datos de media-alta resolución de manera continua durante décadas con los sensores TM (Thematic Mapper) y ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), hasta la reciente misión Landsat 8 OLI (Operational Land Imager) de mayor resolución espectral y temporal. El tamaño de la escena de adquisición de datos (parte de la superficie terrestre incluida en cada imagen) es de 180x180 km aproximadamente y el periodo transcurrido entre la toma de dos imágenes consecutivas es de 16 días.

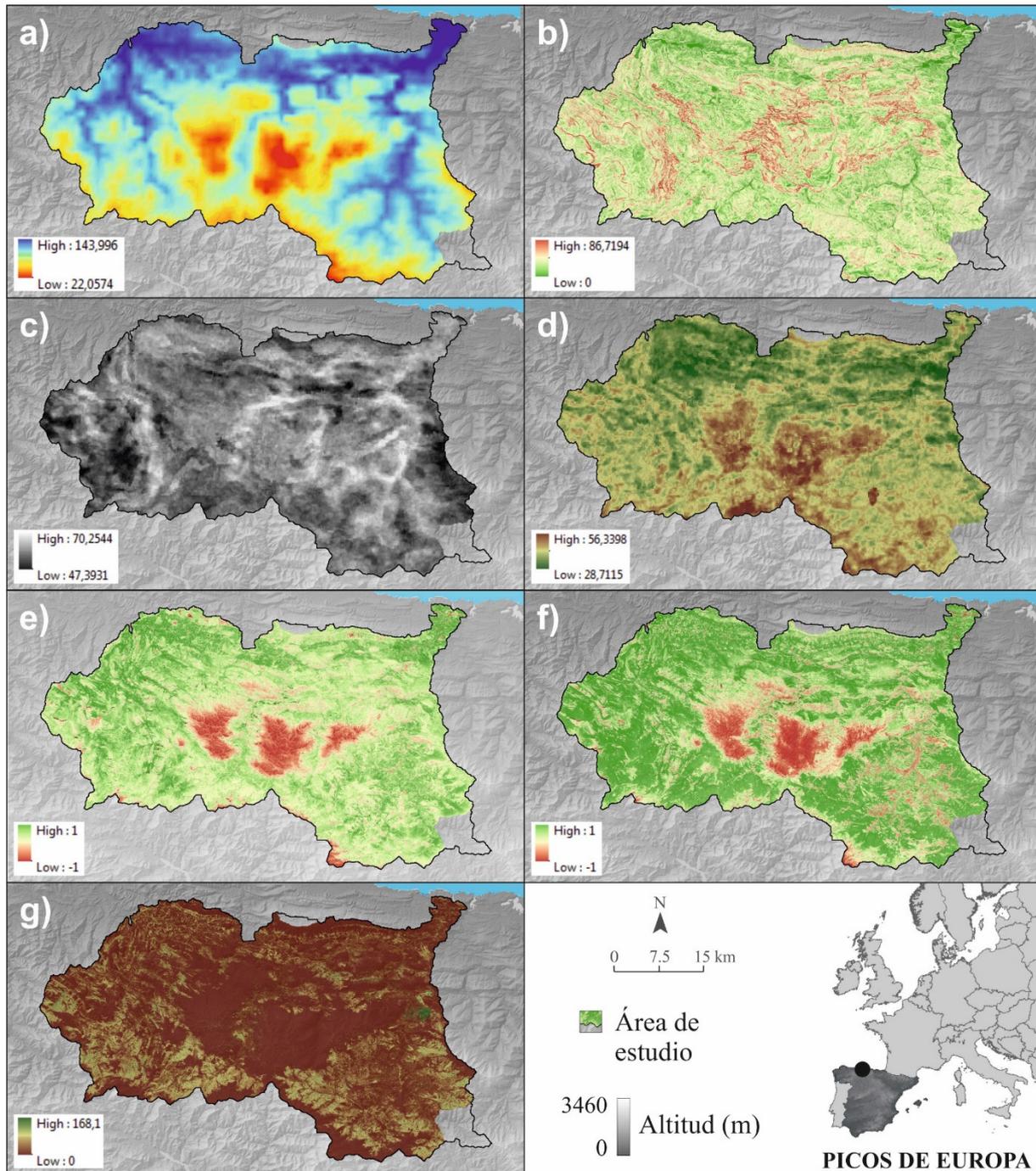


Figura 8. Diferentes variables utilizadas en el proceso de modelado de Picos de Europa. a) Temperatura media anual (grados centígrados), b) pendiente (grados), c) pH (unidades de pHx10), d) % de arena del horizonte superficial del suelo (%), e) NDVI de primavera (abril), f) NDVI de verano (agosto), g) altura estimada del dosel vegetal obtenida de información LiDAR (m). Idéntica base de datos ha sido desarrollada para los 3 PPNN.

Por su parte, los Sentinel son una nueva flota de satélites diseñada específicamente para proporcionar los abundantes datos e imágenes de que se nutre el programa Copernicus, de la Comisión Europea. Este programa único de vigilancia medioambiental está cambiando drásticamente la forma en que gestionamos nuestro entorno, entendemos y abordamos los efectos del cambio climático y protegemos nuestra vida cotidiana. Sentinel 2 llevan una innovadora cámara multispectral de alta resolución, con 13 bandas espectrales que aportan una nueva perspectiva de la superficie terrestre y la vegetación. La combinación de la alta resolución y las nuevas capacidades espectrales, así como un campo de visión que abarca 290 kilómetros de anchura y sobrevuelos frecuentes, proporcionará vistas de la Tierra sin precedentes. La misión se basa en una constelación de dos satélites idénticos en la misma órbita, separados por 180 grados, para lograr una cobertura y una descarga de datos óptimos. Cada cinco días los satélites cubren todas las superficies terrestres, grandes islas y aguas costeras. Una de las mayores aplicaciones de los Sentinel-2 consiste en el mapeo del estado y los cambios de la superficie terrestre, la contaminación en lagos y aguas costeras, inundaciones, erupciones volcánicas y deslizamientos. Con su cámara multispectral y su amplia cobertura, la misión Sentinel-2 ofrece no solo continuidad, sino que amplía las capacidades de las misiones Spot, francesa, y Landsat, estadounidense.

4.2. Cambio en la ocupación del suelo

La combinación de puntos de entrenamiento y variables predictoras mediante el uso de algoritmos de modelado permite generar mapas continuos de la ocupación del suelo a partir de las observaciones puntuales de verdad terreno. Los mapas resultantes son raster probabilísticos, lo que permite conocer de forma espacialmente explícita, además de la probabilidad de ocurrencia o idoneidad del territorio para encontrar la unidad paisajística modelada, una estimación de la incertidumbre asociada a esa predicción. El resultado de la predicción y de la incertidumbre asociada depende, por otro lado, de todos los factores que intervienen en el proceso, como son los puntos de entrenamiento (precisión, exactitud y representatividad), las variables predictoras (resolución y capacidad explicativa) y el algoritmo de modelado. Los dos primeros han sido optimizados mediante revisiones y selección de las mejores variables posibles, como se ha explicado anteriormente. Por su parte, se ha aplicado un análisis de sensibilidad a nivel de algoritmia con el objetivo de evaluar los resultados de varios algoritmos candidatos y elegir, finalmente, el más adecuado de todos ellos en base a validaciones estadísticas propias de los procesos de modelado (AUC, Kappa, desviación explicada, etc.).

4.2.1. Algoritmos de modelado.

En IVERCAM se han utilizado los siguientes algoritmos.

(1) *Maximum Likelihood o Clasificación de máxima verosimilitud (ML)*. La herramienta ML tiene en cuenta las varianzas y covarianzas de las firmas de clases cuando asigna cada celda a una de las clases representadas. Si se asume que la distribución de una muestra de clases es normal, una clase puede estar caracterizada por el vector del valor medio y la matriz de covarianza. Dadas estas dos características para cada valor de celda, se calcula la probabilidad estadística para cada clase a fin de determinar la pertenencia de las celdas a la clase. Como se ha comentado, cuando se realiza una clasificación de máxima verosimilitud, también se puede producir un ráster de confianza de salida opcional que dé cuenta de los niveles de confianza de la clasificación.

(2) *MaxEnt (Maximum Entropy Approach to Species Distribution Modeling)*. Maxent es un algoritmo cuya teoría está sumamente bien entendida (Elith et al. 2011) y que en la práctica ha demostrado dar buenos resultados. La salida de Maxent es una medida de similitud de los ambientes en cada pixel a los pixeles donde la especie ha sido observada. Podría considerarse como una aproximación a la distribución potencial. NO obstante, bajo el supuesto de que se puede asignar un valor conocido de probabilidad de observación a los pixeles llamados "típicos", se considera que la salida logística de Maxent es una aproximación a la verdadera probabilidad de presencia.

(3) *Support Vector Machines o Máquinas de Vectores Soporte (SVM)*. Las SVM constituyen un método basado en aprendizaje para la resolución de problemas de clasificación y regresión. En ambos casos, esta resolución se basa en una primera fase de entrenamiento (donde se les informa con múltiples ejemplos ya resueltos y una segunda fase de uso para la resolución de problemas. En ella, las SVM se convierten en una "caja negra" que proporciona una respuesta (salida) a un problema dado (entrada). Como un clasificador de una sola clase, la descripción dada por los datos de los vectores de soporte es capaz de formar una frontera de decisión alrededor del dominio de los datos de aprendizaje con muy poco o ningún conocimiento de los datos fuera de esta frontera. Los datos son mapeados por medio de un kernel Gaussiano u otro tipo de kernel a un espacio de características en un espacio dimensional más alto, donde se busca la máxima separación entre clases. Esta función de frontera, cuando es traída de regreso al espacio de entrada, puede separar los datos en todas las clases distintas, cada una formando un agrupamiento.

Todos los modelos de ocupación del suelo se han desarrollado con los tres algoritmos. Los resultados obtenidos han sido muy similares en todos ellos, lo que indica una calidad alta de los datos de partida (puntos de entrenamiento y variables predictoras). Se han seleccionado los mapas correspondientes al algoritmo Maxent por presentar una menor dispersión de clases respecto a ML y SVM al reducir considerablemente el "efecto sal y pimienta", relativo a la existencia de pixeles aislados en torno a manchas de mayor tamaño.

4.2.2. Dinámica de los patrones de ocupación del suelo.

Usando los algoritmos mencionados y las bases de datos disponibles se han generado mapas de ocupación del suelo en diferentes momentos temporales y para los tres PPNN del estudio:

(1) Momento actual. Constituido por el patrón de uso y ocupación del suelo presente, mapas actuales de vegetación y contexto climático actual. Se utiliza la información de los puntos de distribución actuales de las tipologías de paisaje, las imágenes Sentinel 2 y la información LiDAR y las variables ambientales de factores limitantes (clima, topografía y suelo), consideradas estáticas a la escala de análisis.

(2) Situación en el pasado, concretamente a intervalos de 5 años desde el 1985 (en el año 1985, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010 y 2015). Se utiliza la información de los puntos de distribución actual revisados mediante sus firmas espectrales para cada uno de los estadios temporales mencionados, las imágenes Landsat 5 TM de cada año y las variables ambientales de factores limitantes (clima, topografía y suelo), consideradas estáticas a la escala de los análisis. La información LiDAR no ha podido utilizarse al considerarla dinámica de forma significativa en el periodo de estudio.

El análisis de la dinámica de cambios en la ocupación del suelo desde el pasado hasta el momento actual permite obtener una estima de los cambios ocurridos en el paisaje y los patrones de biodiversidad bajo un escenario de cambio climático, el actual. La comparación de los mapas antiguos y más modernos permite cartografiar la evolución del patrón de estructuración del paisaje (en unidades fisionómicas básicas y ciertas cubiertas no vetadas) y los cambios producidos sobre la biodiversidad desde hace 30 años, en las 3 zonas de montaña seleccionadas. Esta información se obtiene mediante el manejo de los mapas generados mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) que constituyen una herramienta imprescindible en Ecología de Paisaje y Cambio Global, posibilitando la manipulación e integración de datos espacialmente explícitos, su análisis numérico, seguimiento espacio-temporal y representación en forma de mapas.

La Figuras 9, 10 y 11 muestran el mapa de 1985 (el mapa histórico inicial de la serie temporal) y 2018 (situación actual) para cada una de las 3 zonas de montaña seleccionadas.

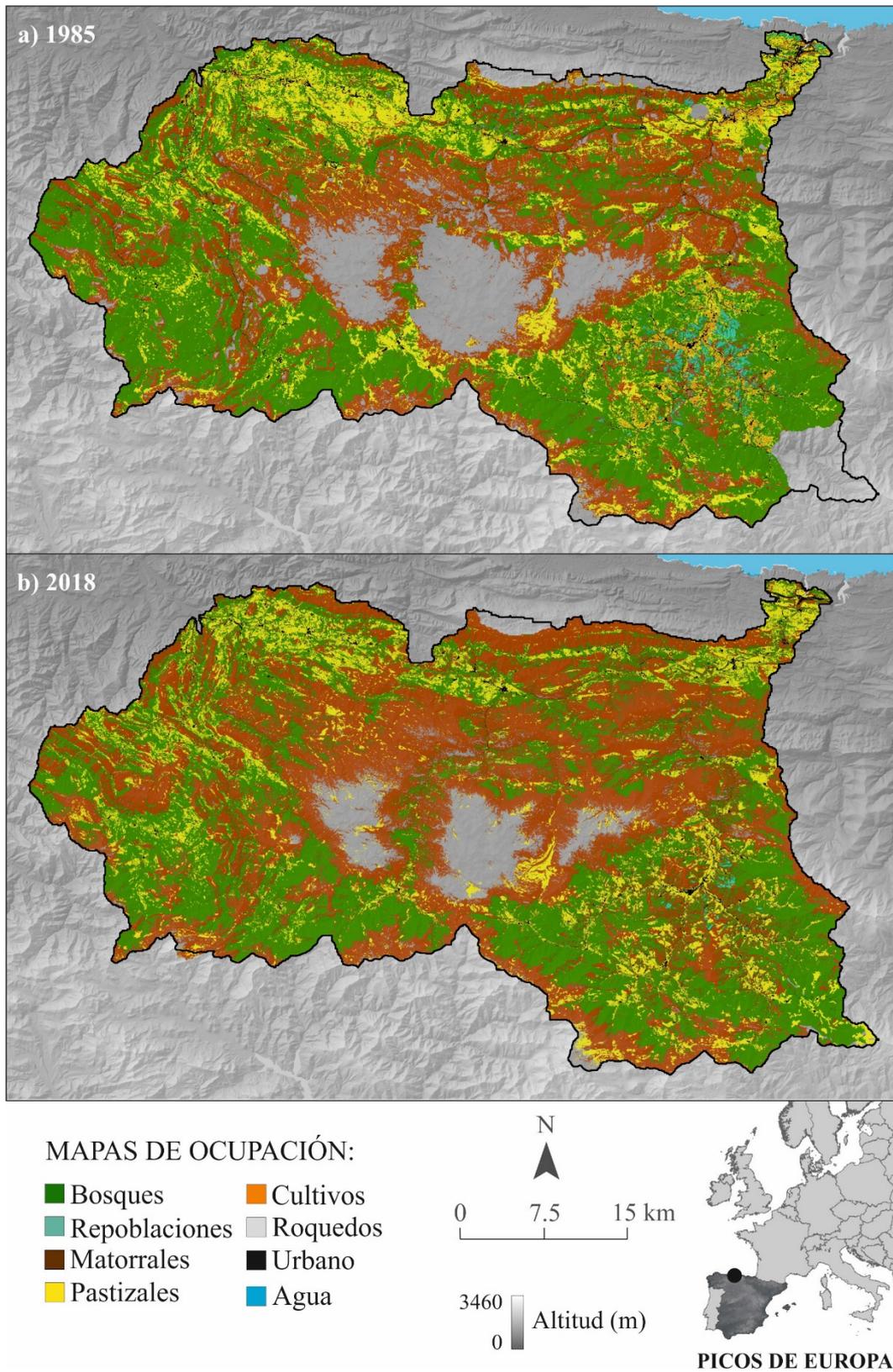


Figura 9. Mapa de ocupación del suelo (unidades fisionómicas de vegetación) para 1985 y el momento actual.

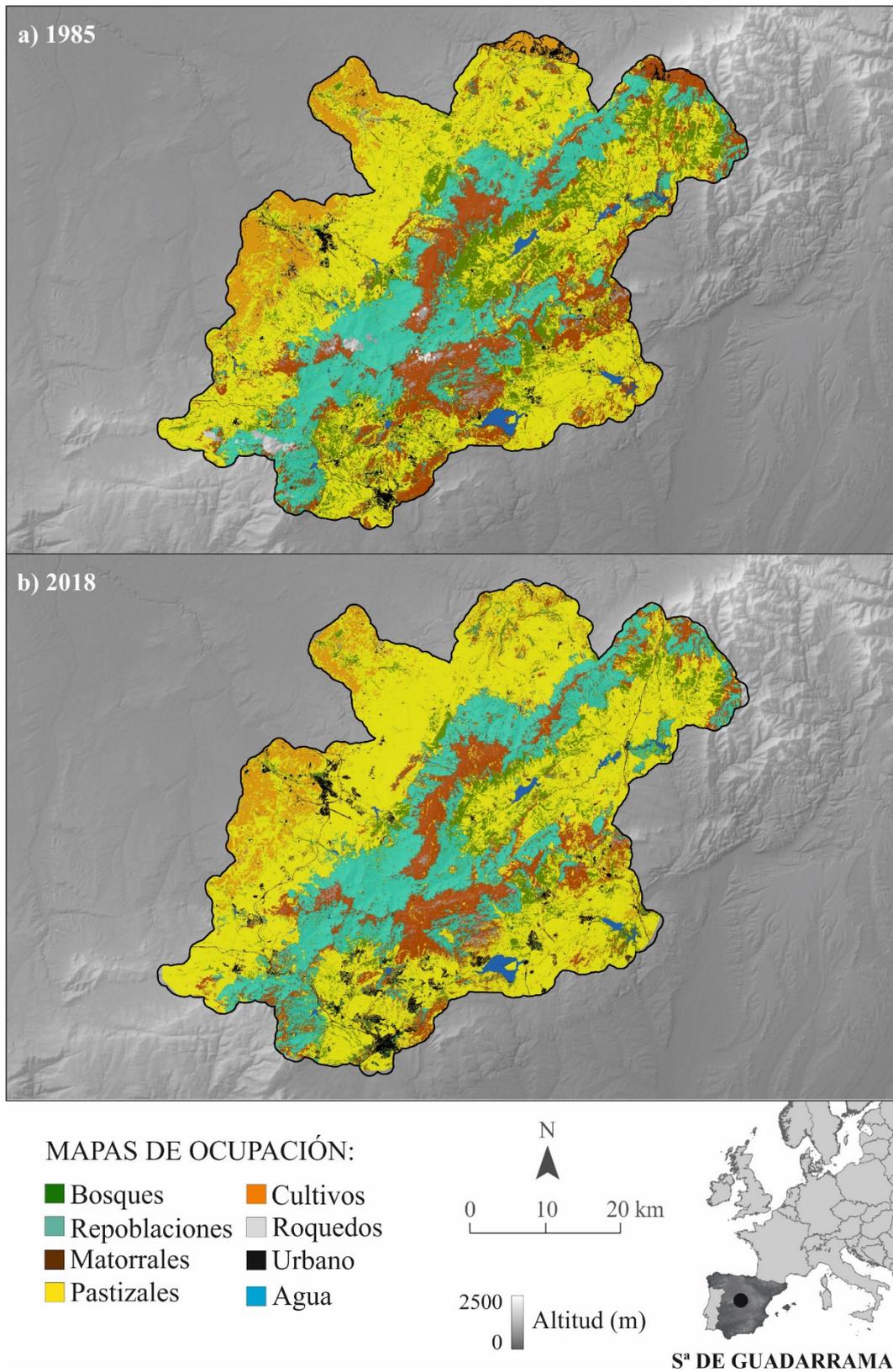


Figura 10. Mapa de ocupación del suelo (unidades fisionómicas de vegetación) para 1985 y el momento actual.

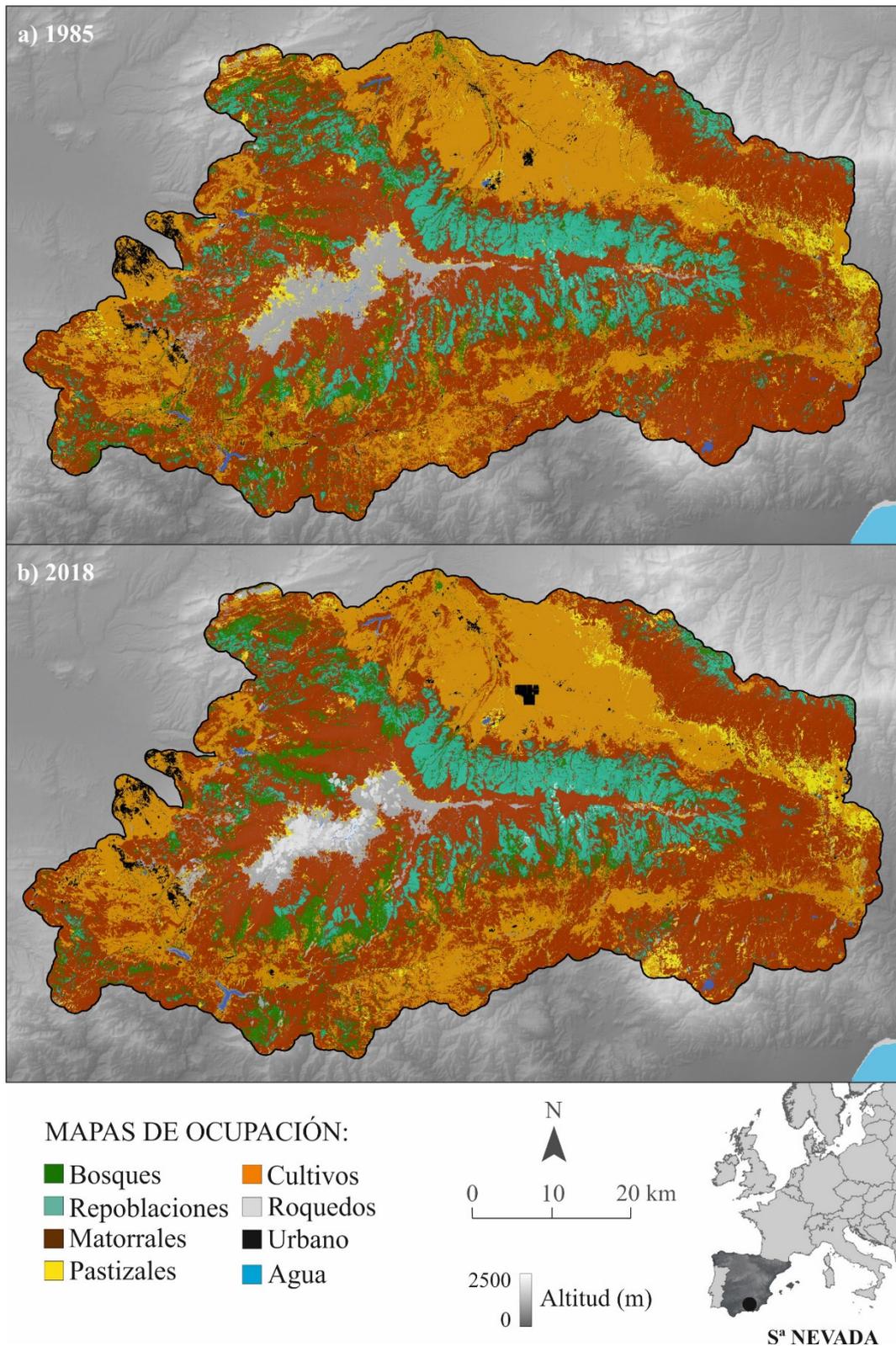


Figura 11. Mapa de ocupación del suelo (unidades fisionómicas de vegetación) para 1985 y el momento actual.

La comparación de las diferentes tipologías de ocupación del suelo entre los mapas (1985, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 y 2018) permite conocer las tasas de cambio entre estas, así como su persistencia entre lapsos temporales. La Tabla 1 muestra la superficie (en hectáreas) que se mantiene como bosque y cambia a bosque desde otras categorías relacionadas sucesionalmente.

PPNN	Periodo	Conservación		Restauración	
		Persistencia del bosque	Colonización de coníferas	Sucesión de matorral	Sucesión de pastizal
Picos de Europa	1985-2018	21922.6	370.84	3084	2567.12
Guadarrama	1985-2018	5412.76	425.84	636.76	1980.92
Sierra Nevada	1985-2018	7198.32	1954.96	3602.6	1476.64

Tabla 1. Superficie de persistencia y expansión del bosque en los 3 PPNN.

Por su parte, las Figuras 12, 13 y 14 muestran la evolución temporal de las cubiertas analizadas tras reducción de los mayores niveles de incertidumbre (ver (Álvarez-Martínez et al. 2010)), demostrando una dinámica sucesional en los 3 PPNN de aumento de la superficie forestal y reducción de pastos, cultivos y matorrales, en términos generales.

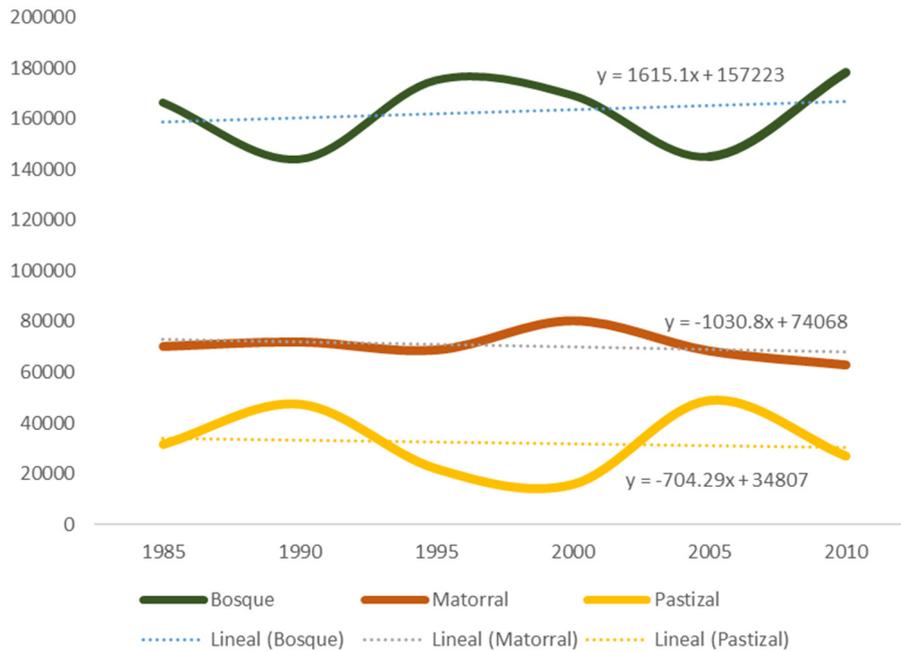


Figura 12. Evolución temporal de la dinámica de la ocupación del suelo en Picos de Europa en las últimas décadas (eje X). El eje Y muestra la cantidad relativa de cambios observados (en número de celdas mapeadas para cada categoría). La línea punteada muestra la tendencia general observada y su ecuación de regresión. La dinámica ha sido evaluada aplicando un alto filtro de la incertidumbre asociada al proceso de clasificación para asegurar el realismo de los cambios detectados (ver (Álvarez-Martínez et al. 2010)).

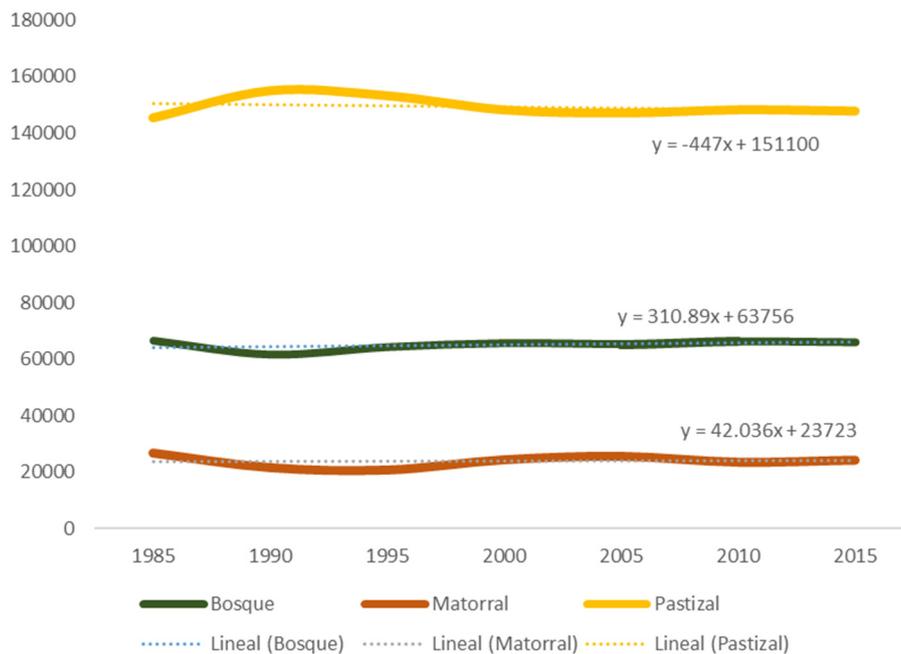


Figura 13. Evolución temporal de la dinámica de la ocupación del suelo en Sª de Guadarrama en las últimas décadas (eje X). El eje Y muestra la cantidad relativa de cambios observados (en número de celdas mapeadas para cada categoría). La línea punteada muestra la tendencia general observada y su ecuación de regresión. La dinámica ha sido evaluada aplicando un alto filtro de la incertidumbre asociada al proceso de clasificación para asegurar el realismo de los cambios detectados (ver (Álvarez-Martínez et al. 2010)).

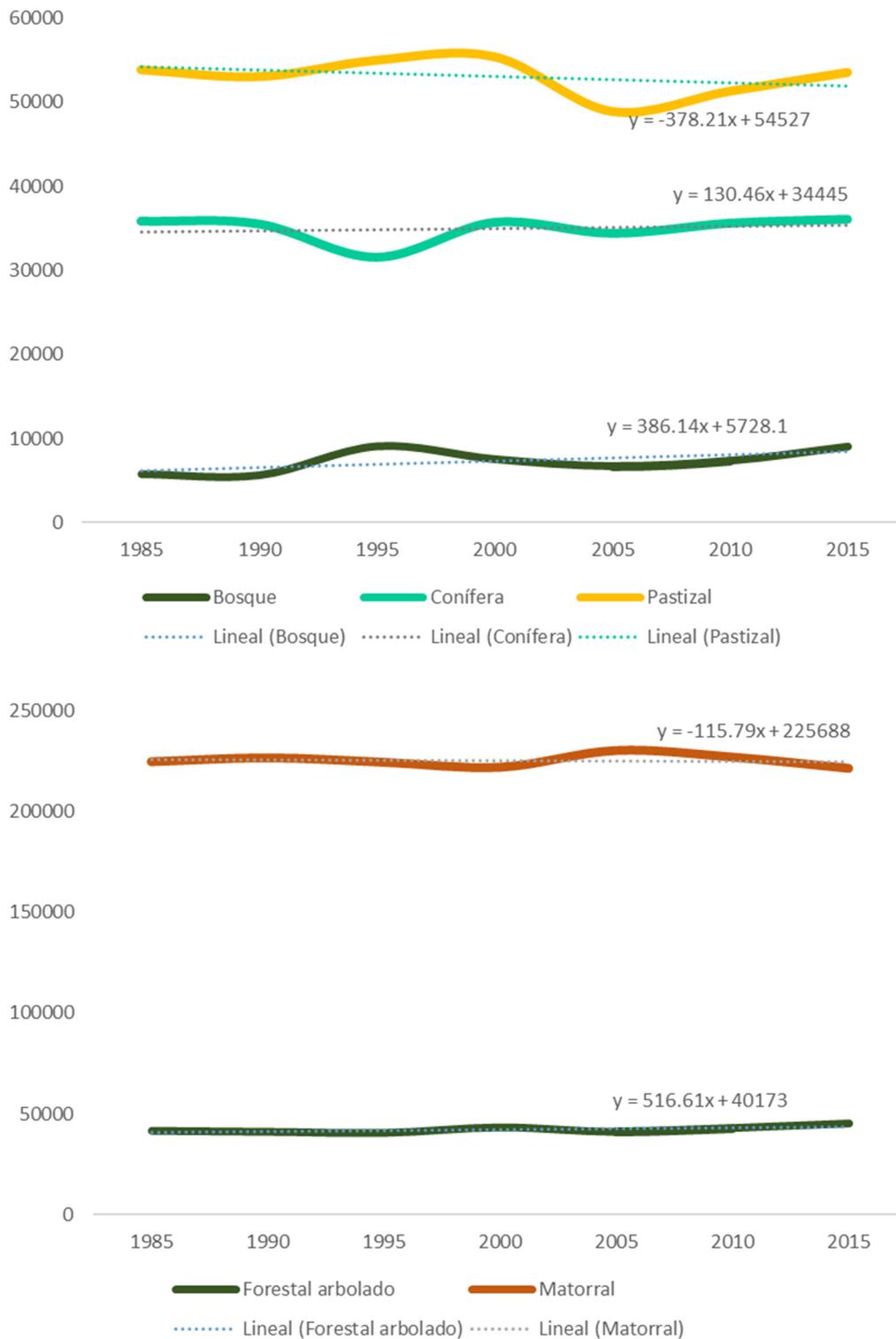


Figura 14. Evolución temporal de la dinámica de la ocupación del suelo en Picos de Europa en las últimas décadas (eje X). El eje Y muestra la cantidad relativa de cambios observados (en número de celdas mapeadas para cada categoría). La línea punteada muestra la tendencia general observada y su ecuación de regresión. La dinámica ha sido evaluada aplicando un alto filtro de la incertidumbre asociada al proceso de clasificación para asegurar el realismo de los cambios detectados (ver (Álvarez-Martínez et al. 2010)).

Las tendencias varían en intensidad entre zonas, disminuyendo de norte a sur. En todos los casos donde se han mapeado coníferas (Figuras 13 y 14), estas presentan una tendencia constante en el tiempo. Por el contrario, las frondosas muestran tendencias significativas de aumento o expansión forestal debido al abandono (Álvarez-Martínez et al. 2014; Álvarez-Martínez et al. 2011).

Durante el proceso de generación de los mapas, se han solucionado numerosos problemas asociados a la no existencia de información de verdad terreno en estadios anteriores al actual. Para ello, se han evaluado los cambios existentes en las firmas espectrales de los puntos actuales verificados mediante inspección visual sobre ortofoto de 2017. Los mapas resultantes han sido evaluados comparativamente con el mapa actual, certificando la no existencia de cambios masivos no realistas que afectasen a la mayor parte del territorio y a las zonas centrales de manchas de paisaje consideradas estables desde tiempos históricos. Se ha tratado además de generar las mismas tipologías vegetales en todas las zonas mediante reclasificación de las tipologías originales de los mapas de vegetación detallados usados como fuente de información de verdad terreno. En el caso de Picos de Europa no se han cartografiado en los cambios las masas de coníferas por su baja representatividad. En el caso de Guadarrama y Sierra Nevada sí se han incluido porque se trata de la unidad de paisaje con mayor cobertura. Su efecto en la evolución de las masas forestales es manifiesto, como muestra la Figura 13 y 14, pues se trata de tipologías más estables que las frondosas, con mayor dinamismo debido fundamentalmente la sucesión secundaria por abandono del territorio.

4.3. Escenarios futuros

El conocimiento de los cambios en los patrones de paisaje permite extrapolar las tendencias observadas a escenarios futuros de forma espacialmente explícita mediante diferentes técnicas geoestadísticas.

En IVERCAM, Se utilizan las dinámicas de cambio observadas del pasado al presente, proyectándolas a un escenario de persistencia (*Business as Usual*, BAU) para el año 2050 (30 años de lapso frente al momento actual) mediante estadística basada en cadenas de Markov y autómatas celulares, que controlan la propagación de las tipologías por vecindad. Este modelado prospectivo se ha realizado a través del uso del software TerrSet (Sistema para el Análisis y Seguimiento de Datos Geoespaciales).

TerrSet es el nuevo software que ha desarrollado Clark Labs en estrecha cooperación con diversas instituciones para el desarrollo sostenible y la conservación medioambiental (Figura 15). Se trata de una constelación integrada de aplicaciones para el seguimiento y el modelado de los sistemas terrestres que ofrece innovadoras herramientas para abordar de forma inteligente los principales desafíos del crecimiento global: cambio climático, cambios en los usos del suelo, variaciones en los ecosistemas, etc. Entre estas aplicaciones se encuentra *Land Change Modeler (LCM)*, una aplicación diseñada para el análisis y la predicción de impactos relacionados con los cambios en los usos del suelo y la pérdida de biodiversidad asociada a ellos, usada en este proyecto.



Figura 15. Portada de TerrSet (Sistema para el Análisis y Seguimiento de Datos Geoespaciales).

En IVERCAM, y en la línea de cumplir los objetivos generales y específicos del proyecto, se han generado dos escenarios de ocupación del suelo a partir de la situación actual:

(1) Escenario de futuro Business As Usual (BAU), BAU-30 años. Se trata de un modelo de la ocupación del suelo para el año 2050 constituido por el patrón de uso y ocupación del suelo resultado de proyectar a 30 años la dinámica de cambio observada del pasado hasta la actualidad, sobre los mapas de actuales de vegetación y el contexto de cambio climático existente. Supone un avance de aprox. 30 años al futuro igual que la estimación de la situación al pasado en 1985 (aprox. 30 años desde 2017).

(2) Escenario de futuro Business As Usual (BAU) con la implementación de Infraestructuras Verdes (IV), BAUIV-30 años. Es el resultado de aplicar la red de infraestructura verde diseñada en IVERCAM para cada una de las 3 zonas de montaña seleccionadas (ver Apartado 6), a la cartografía de paisaje del escenario BAU-30 años.

De este modo, las bases de datos disponibles de los tres PPNN incluidos en el estudio han generado un total de 90 mapas de ocupación del suelo que han permitido:

(1) Predecir la evolución del paisaje (porcentaje de cambio de cada uso y ocupación del suelo) en base al contexto actual de cambio climático en las 3 zonas de montaña seleccionadas. Durante el modelado se ha abordado un análisis de sensibilidad en la definición de los mapas de ocupación del suelo de las últimas décadas para las 3 zonas de estudio a nivel de los algoritmos de modelado.

(2) Determinar el porcentaje de cambio uso y ocupación del suelo entre el estado actual y el escenario futuro de cambio climático (BAU-30 años), con y sin infraestructuras verdes, en las 3 zonas de montaña. El análisis se ha centrado en los cambios relacionados con las masas forestales (pérdida y ganancia entre lapsos temporales).

La comparación de las diferentes tipologías de ocupación del suelo entre el periodo actual y es mapa modelado para el año 2050 con el escenario BAU permite conocer las tasas de cambio de cara al futuro, así como su persistencia en el lapso temporal considerado. La Tabla 2 muestra la superficie (en hectáreas) que se mantiene como bosque y cambia a bosque desde otras categorías relacionadas sucesionalmente.

PPNN	Periodo	Conservación		Restauración	
		Persistencia del bosque	Colonización de coníferas	Sucesión de matorral	Sucesión de pastizal
Picos de Europa	2018-2050	24298.68	78	14526.16	1570.08
Guadarrama	2018-2050	6094.56	541.12	587.16	6598.44
Sierra Nevada	2018-2050	14108.52	468.64	1600.84	87.92

Tabla 2. Superficie de persistencia y expansión del bosque en los 3 PPNN.

En todos los casos la persistencia del bosque es el proceso mayoritario, excepto en Guadarrama, donde el modelo identifica pérdidas de pastizal importantes en base a la dinámica observada. La Comunidad de Madrid, con una alta carga poblacional y dominada económicamente por el sector servicio parece ser la causa de este cambio importante en la estructura del paisaje. No obstante, los sistemas de pastizal y cultivos siguen representando la matriz del paisaje. En Picos de Europa el sistema forestal arbolado domina el paisaje mientras que en Sierra Nevada matorrales, plantaciones de coníferas y tierras agrícolas conforman las unidades más extensas. La Figuras 16, 17 y 18 muestran el mapa de 1985 (el mapa histórico inicial de la serie temporal) y 2018 (situación actual) para cada una de las 3 zonas de montaña seleccionadas.

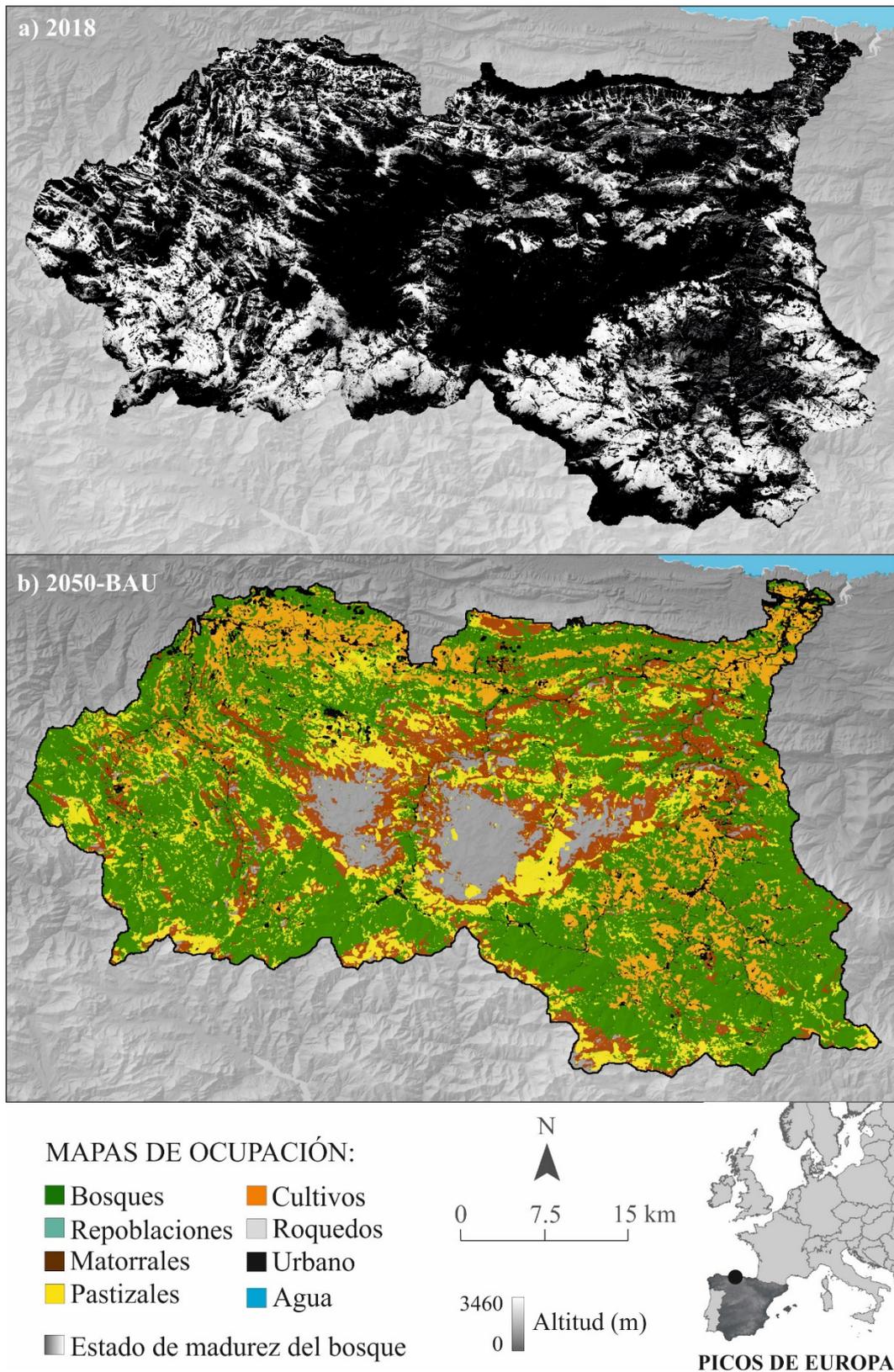


Figura 16. a) Probabilidad de ocurrencia de bosque, que puede entenderse como estado de madurez de las masas forestales en el momento actual. b) Mapa de ocupación del suelo (unidades fisionómicas de vegetación) estimado para el año 2050 a partir de la dinámica observada en las últimas décadas.

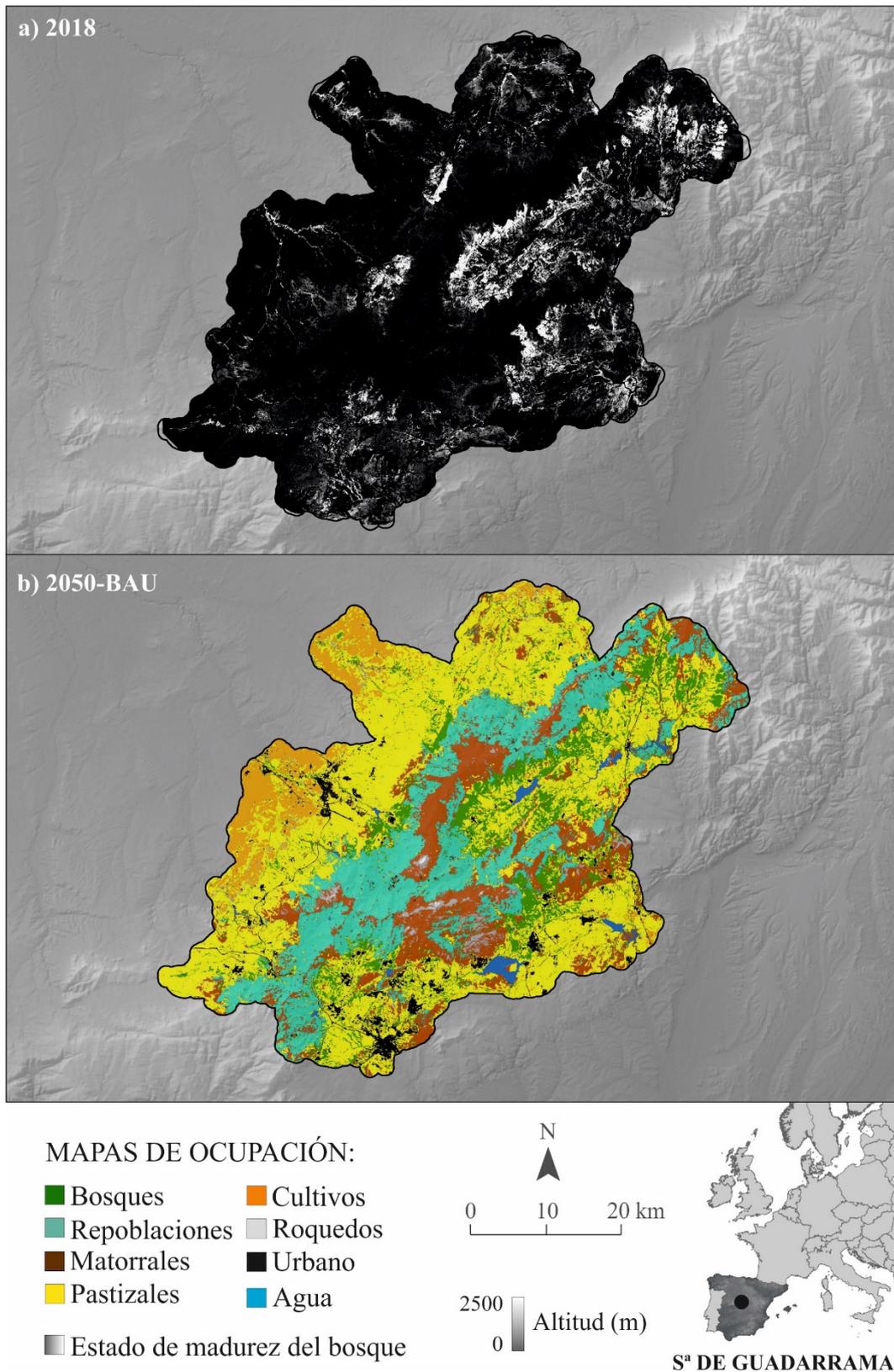


Figura 17. a) Probabilidad de ocurrencia de bosque, que puede entenderse como estado de madurez de las masas forestales en el momento actual. b) Mapa de ocupación del suelo (unidades fisionómicas de vegetación) estimado para el año 2050 a partir de la dinámica observada en las últimas décadas.

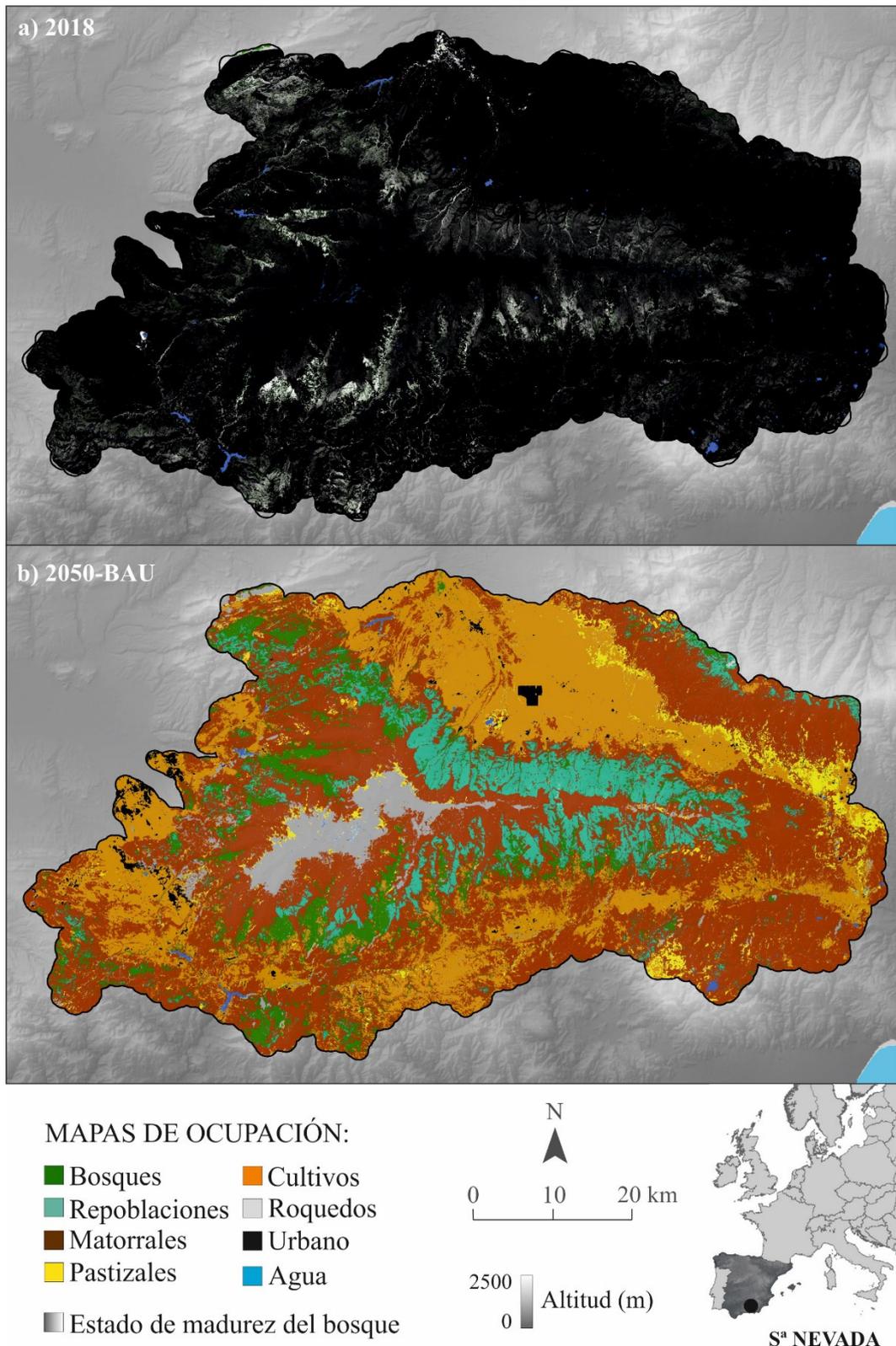


Figura 18. a) Probabilidad de ocurrencia de bosque, que puede entenderse como estado de madurez de las masas forestales en el momento actual. b) Mapa de ocupación del suelo (unidades fisionómicas de vegetación) estimado para el año 2050 a partir de la dinámica observada en las últimas décadas.

A modo de síntesis de resultados, cada uno de los 3 PPNN de montaña seleccionados presentan 10 mapas: 1 para la situación actual (unidades fisionómicas o estructura del paisaje), 7 para los lapsos temporales de 5 años (1985 hasta la actualidad) y 2 para el escenario BAU-30 años (con y sin infraestructuras verdes) y 2 escenarios de futuro (con y sin infraestructuras verdes). Además, todos estos resultados se han generado con los 3 algoritmos de modelado presentados anteriormente, lo que supone 90 mapas que ayudan a determinar con mayor robustez las conclusiones del proyecto, otorgando una mayor credibilidad a los resultados obtenidos en el análisis de la dinámica del paisaje.

Tras analizar todos estos mapas y explorar los cambios ocurridos en la estructura del paisaje, se ha determinado que los Escenario de futuro Business As Usual (BAU), BAU-30 años, que se trata de un modelo de la ocupación del suelo para el año 2050 resultado de proyectar a 30 años la dinámica de cambio observada, es de forma inequívoca la base estructural del escenario de futuro Business As Usual (BAU) con la implementación de Infraestructuras Verdes (IV), BAUIV-30 años, resultante de aplicar la red de infraestructura verde diseñada en IVERCAM para cada una de las 3 zonas de montaña seleccionadas (ver Apartado 6). Tras evaluar los cambios ocurridos y ciertas relaciones funcionales (vegetación-suelo-procesos fluviales), y proceder a las reuniones con agentes de la administración y académicos relacionados con la gestión de los PPNN, se ha concluido que la Infraestructura Verde está íntimamente relacionada con el proceso de sucesión secundaria ocurrido, con mayor o menor intensidad, en los 3 PPNN de montaña. Básicamente esta sucesión, en términos de Infraestructura Verde, se relaciona con la persistencia y expansión forestal sobre plantaciones de conífera, pastizales y matorrales. A esta red primaria procedente de la dinámica sucesional del paisaje se le deben unir ciertos elementos que den respuesta demandas específicas relacionadas, por ejemplo, con la erosión por escorrentía, la protección de los cauces o los picos de inundación en ciertas zonas sensibles, donde se requerirán acciones específicas de intervención activa en el medio.

5. MODELIZACIÓN HIDROCLIMÁTICA

El objetivo de este paquete de trabajo fue crear un modelo hidrológico de cada una de las tres zonas de montaña seleccionadas que permitiera cuantificar los efectos del cambio climático sobre el ciclo del agua y sedimentos, identificar las zonas y criterios más apropiadas para la implantación de las infraestructuras verdes.

Como modelo hidrológico se adoptó inicialmente el modelo TETIS v9 (IIAMA, 2018), por los motivos explicados en el apartado 5.1.1. Sin embargo, conocido el trabajo de más de una década que ha hecho el Grupo de Dinámica Fluvial e Hidrología de la Universidad de Córdoba en Sierra Nevada, para este PN se utilizaron los resultados de sus investigaciones^{1,2} (M.J. Pérez-Palazón, Pimentel, & Polo, 2018; María José Pérez-Palazón, Pimentel, Herrero, & José Polo, 2016, 2017). Este grupo ha desarrollado el modelo hidrológico WiMMed (Herrero et al., 2011) específicamente para simular la hidrología en Sierra Nevada, fuertemente marcada por el ciclo nival. Por brevedad, y porque no es un trabajo propio del IH Cantabria, se remite a las referencias antes citadas para conocer la metodología utilizada en el modelo hidrológico de Sierra Nevada. En este informe se incluyen únicamente los resultados que nos han cedido.

5.1. Descripción del modelo TETIS v9

El modelo aplicado en la simulación hidrológico fue el TETIS v.9.0 (IIAMA, 2018). TETIS es un modelo hidrológico conceptual y distribuido desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia, empleado habitualmente en el campo de la hidrología en España y Latinoamérica.

Es un modelo conceptual porque reproduce los procesos físicos que suceden en el ciclo hidrológico de una forma simplificada, es decir, sin aplicar las ecuaciones físicas que describen dichos procesos, reduciendo de dicho modo la necesidad de observaciones y el tiempo de computación.

Es además un modelo distribuido porque disgrega el ámbito de estudio en una malla regular de cuadrados de resolución dada. A diferencia de los modelos agregados (o semi-distribuidos), en los que la unidad de cálculo es la cuenca hidrográfica (o subcuenca), los modelos distribuidos calculan el balance hídrico sobre cada una de las celdas de la malla. Son modelos con un coste computacional mucho mayor, pero que permiten definir la variabilidad espacial del clima, la vegetación y el suelo. Estos modelos son de especial interés en estudios como el aquí presentado, en los que se quiere analizar qué está ocurriendo en zonas concretas del territorio, no en la cuenca como conjunto, y actuar sobre dichas zonas concretas.

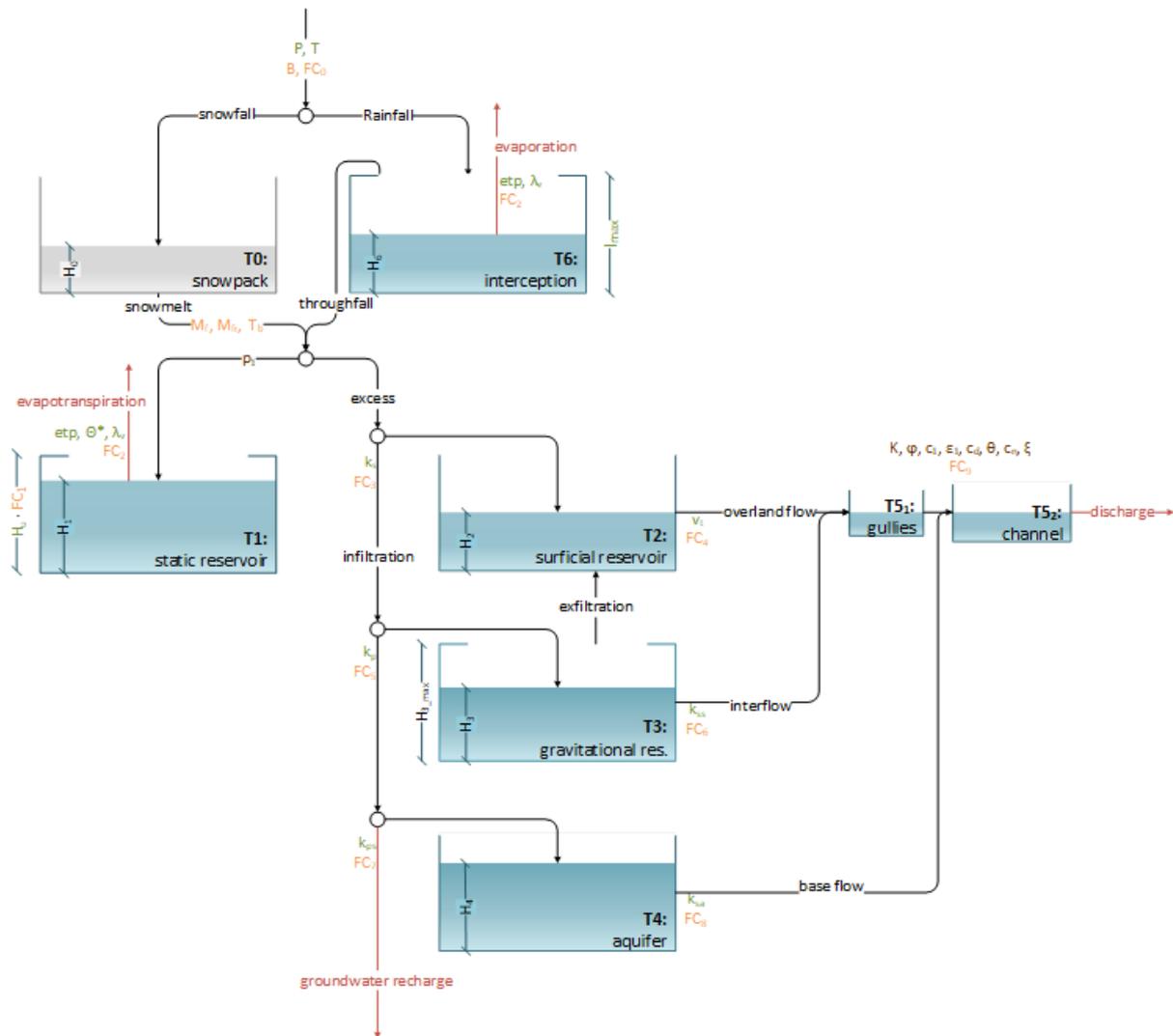
TETIS es un modelo hidrológico cuyo objetivo principal es la simulación del caudal circulante por una serie de puntos de la red de drenaje. El módulo de erosión permite simular, además, el caudal sólido en dichos puntos. Como resultado del balance hídrico en cada celda, se obtiene el valor de cada una de las variables de estado del modelo en cada paso temporal, permitiendo generar secuencias de mapas de cada una de ellas.

¹ Proyecto de la Fundación Biodiversidad FB2013 "Estudio del efecto del cambio global sobre la nieve y la hidrología de alta montaña en el Parque Nacional de Sierra Nevada"

² Proyecto de la Fundación Biodiversidad FB2014 "Influencia del cambio global en los servicios ecosistémicos asociados a la hidrología en el Parque Nacional de Sierra Nevada"

5.1.1. Simulación hidrológica

En la Figura 199 se muestra la conceptualización del ciclo hidrológico en TETIS. Éste es un modelo de tanques, en el que cada uno de ellos representa el agua almacenada en distintas partes de la hidrosfera. En concreto, se divide en siete tanques, correspondientes a la nieve (T0), la interceptación en la vegetación (T6), el agua almacenada en el suelo superficial por debajo de la capacidad de campo (T1), el agua almacenada en el suelo superficial por encima de la capacidad de campo (T2), el agua presente en la zona no saturada (T3), en la zona saturada (T4) y en los cauces (T5). Las variables de estado del modelo son el almacenamiento en cada uno de estos tanques.



Inputs: time series and physical properties
Non-adjustable model parameters
Adjustable model parameters
Outputs

Figura 19. Esquema del modelo conceptual TETIS v9.0. Elaboración propia a partir de (IIAMA, 2018).

Las conexiones entre tanques se hacen mediante conceptualizaciones simplificadas de los procesos físicos. Seguidamente se explican de forma resumida alguno de los principales procesos reproducidos por el modelo.

Módulo de nieve

En el módulo de nieve reproduce la acumulación y fusión de la nieve. Para la acumulación, se considera que la precipitación ocurre en forma de nieve siempre que la temperatura media en el paso temporal correspondiente sea inferior a 0 °C. Por su parte, la fusión de la nieve se simula por medio del método de grado-día, un método conceptual que, si bien simplista, es de amplio uso en hidrología.

El método grado-día simula la fusión diaria ($M(t)$ en mm) por medio de tres parámetros: la temperatura umbral por encima de la cual empieza la fusión (T_b en °C), la cantidad de agua que se derrite en un día por cada grado en el que la temperatura media se desvía sobre la temperatura umbral (DDF_1 en mm/(°C·d)), y esa tasa de fusión diaria en caso de que además haya precipitación en ese día (DDF_2 en mm/(°C·d)), con lo que se tiene en cuenta la mayor tasa de fusión que se produce en días lluviosos.

Para reproducir la variabilidad espacial del ciclo nival, TETIS añade un término adimensional de radiación ($I_R(t)$ [-]) correspondiente al cociente entre la radiación incidente en un punto teniendo en cuenta la topografía, frente a si se considera ésta plana.

En resumen, la formulación es la siguiente:

$$M(t) = \begin{cases} DDF_1 \cdot I_R(t) \cdot [T_{med}(t) - T_b] & , \text{ si } T_{med}(t) \geq T_b \text{ y } P(t) = 0 \text{ mm} \\ DDF_2 \cdot I_R(t) \cdot [T_{med}(t) - T_b] & , \text{ si } T_{med}(t) \geq T_b \text{ y } P(t) > 0 \text{ mm} \\ 0 & , \text{ si } T_{med}(t) < T_b \end{cases} \quad (1)$$

Donde $T_a(t)$ es la temperatura media diaria y $P(t)$ la precipitación acumulada en el día t .

Evapotranspiración

TETIS considera que la evapotranspiración se origina en dos tanques: el tanque de precipitación interceptada por la vegetación (T6) y el tanque estático (T1), es decir, el agua disponible en el suelo para la transpiración de las plantas.

TETIS no calcula implícitamente la evapotranspiración, sino que requiere como datos de entrada la serie de evapotranspiración potencial (ETP). Sobre esta serie calcula la evapotranspiración real a través del coeficiente de cultivo ($\lambda_v(t)$ [-]), cociente adimensional entre la evapotranspiración real en un tipo de vegetación y la evapotranspiración potencial. El modelador ha de introducir la serie mensual del coeficiente de cultivo para cada tipo de cobertura de vegetación definido en el modelo (ver Tabla).

Calculada la evapotranspiración real en cada celda ($ETP \cdot \lambda_v(t)$), ésta debe distribuirse entre los dos tanques. TETIS consume inicialmente la evapotranspiración real como evaporación (E) desde el tanque de interceptación (T6), si hay agua almacenada en dicho tanque. La capacidad sobrante de evapotranspiración real se consume como evapotranspiración (ET) desde T1, si hay agua suficiente en dicho tanque. En este último cálculo se incluye un factor de corrección en función de la humedad del suelo ($f(\theta)$), utilizado para simular el cierre de los estomas de las plantas en función del estrés hídrico.

$$E = Y_6 = \min\{ETP \cdot \lambda_v(t) \cdot FC_2, H_6\} \quad (2)$$

$$ET = Y_1 = \min\{(ETP \cdot FC_2 - Y_6) \cdot \lambda_v(t) \cdot f(\theta), H_1\} \quad (3)$$

Flujos verticales: infiltración, percolación y recarga subterránea

El agua proveniente bien directamente de la precipitación bien de la fusión de la nieve es repartida verticalmente entre cuatro tanques: el tanque estático (T1), el superficial (T2), el gravitacional (T3) y el acuífero (T4).

El **almacenamiento estático** (T1) representa el agua absorbida por el suelo entre el punto de marchitez y la capacidad de campo hasta la profundidad efectiva de las raíces. Es decir, es el agua susceptible de ser transpirada por las plantas, por lo que su única salida es la evapotranspiración. La cantidad de fusión (M) y la precipitación (P) que entra en este tanque viene definida por la ecuación (4). Esta ecuación establece que no puede entrar más agua que el límite de almacenamiento del tanque ($H_u \cdot FC_1$) y fija a través del parámetro p_1 la proporción del almacenamiento sobrante que se llena. Un valor de p_1 de cero supone que nada de agua se deriva a los tanques T2, T3 y T4 hasta que se llena el T1. Valores superiores de p_1 permiten un mayor flujo hacia el resto de tanques aun cuando T1 está por debajo de la capacidad de campo, es decir, no está lleno.

$$I_1 = \min \left\{ (M + P) \cdot \left(1 - \frac{H_1}{H_u \cdot FC_1} \right)^{p_1}, H_u \cdot FC_1 - H_1 \right\} \quad (4)$$

Donde H_1 es el almacenamiento actual en T1 y $H_u \cdot FC_1$ el máximo almacenamiento posible.

El **almacenamiento superficial** (T2) representa el agua almacenada en la superficie y susceptible de generar escorrentía superficial. La entrada de agua en este tanque es la diferencia entre el exceso de precipitación no almacenado en T1 y la infiltración.

El **almacenamiento gravitacional** (T3) representa el agua contenida en la zona no saturada del suelo por encima de la capacidad de campo, es decir, el agua susceptible de moverse tanto vertical como horizontalmente. La entrada a este tanque es la diferencia entre la infiltración y la percolación.

El **acuífero** (T4) representa la zona saturada del suelo. La entrada de agua en este tanque es la diferencia entre la percolación y la recarga profunda, considerada como pérdida en el modelo.

Infiltración, percolación y recarga profunda se calculan mediante la misma formulación (5), variando los parámetros de la ecuación.

$$X_i = \min \{ X_{i-1}, \Delta t \cdot k_{v,i} \cdot FC_{2i-1} \} \quad i = \{2,3,4\} \quad (5)$$

Donde X_i representa cada uno de los flujos verticales (X_1 : exceso de precipitación, X_2 : infiltración, X_3 : percolación, X_4 : recarga profunda), Δt es la resolución temporal de la simulación, y $k_{v,i} \cdot FC_{2i-1}$ es la conductividad hidráulica vertical saturada de cada uno de los tanques.

Flujos laterales: flujo superficial, interflujo y flujo base

El agua repartida verticalmente según lo explicado en el apartado anterior se conecta con los cauces a través de tres tipos de flujo: el almacenamiento superficial (T2) genera el flujo superficial en ladera; el almacenamiento gravitacional (T3) genera el interflujo; el acuífero (T4) genera el flujo base. Con estos tres tipos de flujo se pretende representar la diferente reactividad de la cuenca ante los eventos de precipitación. Mientras que el flujo superficial

y el interflujo serán directamente dependientes de la ocurrencia de precipitación o fusión, el flujo base es estable a lo largo del año, mostrando únicamente una variación estacional.

Los tres tipos de flujo se reproducen mediante embalses lineales, donde el caudal de salida en el momento t ($O_{i,t}$ [mm]) es función del almacenamiento en el paso anterior ($S_{i,t-1}$ [mm]) y las entradas en el paso actual ($I_{j,t}$ [mm]) a través de una constante (α_i [-]).

$$O_{i,t} = \alpha_i \cdot \left(\sum_j I_{j,t} + S_{i,t-1} \right) \quad i = \{2,3,4\} \quad (6)$$

$$\alpha_i = 1 - \frac{\Delta x}{k_{h,i} \cdot FC_{2i} \cdot \Delta t + \Delta x} \quad i = \{2,3,4\}$$

Donde i corresponde a los tres tanques involucrados, $k_{h,i} \cdot FC_{2i}$ es la conductividad hidráulica horizontal saturada de cada uno de los tanques, Δt y Δx son respectivamente la resolución temporal y espacial del modelo.

Enrutamiento en cauces

Los tres tipos de flujo anteriormente citados llegan a los cauces, donde debe simularse la traslación y laminación que sufren los hidrogramas a lo largo de su recorrido.

TETIS define dos tipos de cauce: cárcavas y canales. Las cárcavas corresponden a corrientes intermitentes alimentadas únicamente por el flujo superficial y el interflujo, es decir, por las que discurre agua únicamente tras un evento de precipitación o fusión. Los canales son las corrientes permanentes surtidas por los tres tipos de flujo y por las cárcavas. La distinción entre estos dos tipos de cauce se hace a través de un umbral de área de cuenca drenante, considerando los cauces por encima de dicho umbral como canales y el resto como cárcavas.

Para el enrutamiento de caudales a través de los cauces, TETIS aplica la ecuación de la onda cinemática, una simplificación de las ecuaciones de Saint Venant que elimina los términos de inercia y presión. TETIS hace una aproximación a este método, denominado onda cinemática geomorfológica, en el que calcula el perímetro mojado (w_t) y el número de Manning (n) a partir de leyes potenciales que utilizan datos geomorfológicos del cauce.

$$Q_t = A_t \cdot v_t = A_t \frac{A_t^{2/3} \cdot S_o^{1/2}}{w_t^{2/3} \cdot n} \quad (7)$$

$$w_t = c_2 Q_t^{\varepsilon_2} = c_1 (\kappa \cdot A^\varphi)^{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} Q_t^{\varepsilon_2}$$

$$n = c_n d^\xi = c_n [c_d (y \cdot S_o)^\theta]^\xi$$

Donde c_1 , c_n , c_d , κ , φ , ε_1 , ε_2 , θ y ξ son los 9 parámetros geomorfológicos que es necesario fijar por separado para las cárcavas y los cauces.

Otros módulos

Además del balance hídrico anteriormente resumido, TETIS incluye módulos capaces de simular otras características de la cuenca como la existencia de embalses, el efecto de zonas kársticas o la dinámica estacional de la vegetación. De ellos, en este proyecto sólo se ha usado el módulo de karst en Picos de Europa.

5.1.2. Simulación de sedimentos

Una vez simulada la hidrología, TETIS es capaz de hacer una aproximación a los procesos erosivos en la cuenca. Para ello distingue, al igual que hacía en el balance hidrológico, los procesos en ladera de los procesos en cauces.

La erosión en ladera es simulada a través de la ecuación de capacidad de transporte de Kilinc y Richardson modificada (Julien, 1998).

$$q_t = 23210 \cdot S_o^{1.66} \cdot \left(\frac{Q}{W}\right)^{2.035} \frac{K}{0.15} \cdot C \cdot P \quad (8)$$

Donde q_t es la producción unitaria de caudal sólido a partir de un caudal líquido unitario ($\frac{Q}{W}$, donde Q es el caudal y W el ancho), S_o la pendiente del cauce, y K , C y P son los coeficientes de la ecuación USLE (*universal soil loss equation*) (Renard, Laflen, Foster, & McCool, 1994), que representan respectivamente el factor de erosionabilidad del suelo, el factor de cultivo y el factor de prácticas de conservación.

El transporte del sedimento en cauces se simula a través de la ecuación de Engelund y Hansen (Engelund & Hansen, 1967). Mediante la ecuación (9) se calcula la concentración de sedimentos (C_{wi}) por peso para cada granulometría. Con este valor, se calcula a través de la ecuación (10) el caudal sólido de cada tipo de grano que es capaz de transportar el caudal).

$$C_{wi} = 0.05 \cdot \left(\frac{G}{G-1}\right) \cdot \frac{v \cdot S_f}{\sqrt{(G-1) \cdot g \cdot ds_i}} \cdot \sqrt{\frac{S_f}{(G-1) \cdot ds_i}} \quad (9)$$

$$Q_{si} = \frac{Q \cdot C_{wi} \cdot dt}{2.65} \quad (10)$$

Donde G es la gravedad específica del sedimento, v [m/s] es la velocidad media del flujo en el canal, S_f [m/m] es el ángulo de fricción del canal, ds_i [m] es el diámetro del tamaño de grano i , R_h [m] es el radio hidráulico, y Q [m³/s] es el caudal líquido circulante.

5.1.3. Calibración del modelo

Al ser un modelo conceptual, TETIS utiliza parámetros no físicos dentro de la modelización de los procesos anteriormente mencionados. Los valores de estos parámetros son aproximados, pudiendo no obtenerse buenos resultados en la simulación si se utilizan valores por defecto. Es por ello que TETIS incluye un algoritmo de calibración automática para ajustar los parámetros del modelo.

Dentro de los parámetros de TETIS hay dos grupos, aquellos parámetros que tienen un valor fijo aplicable a toda la cuenca de estudio, p.ej. el índice grado-día del módulo de nieve, y aquellos otros que varían espacialmente y se introducen como un mapa. Para simplificar la calibración de estos últimos, TETIS aplica una serie de factores correctores (FC_x en la Figura 199 y en la formulación anterior) que afectan por igual a todas las celdas del mapa que lo caracteriza. Por el contrario, la calibración de los parámetros con un valor constante para toda la cuenta no requiere de dicho factor corrector, haciéndose directamente sobre el valor del parámetro.

El algoritmo de calibración automática utilizado por TETIS es el *shuffle complex evolution* – *University of Arizona* (SCE-UA) (Duan, Sorooshian, & Gupta, 1992). El SCE-UA es un algoritmo genético específicamente creado para la optimización de modelos conceptuales de lluvia-escorrentía. El algoritmo parte de una serie de simulaciones realizadas sobre s puntos aleatorios del espacio de parámetros. Los s puntos se dividen en p complejos, los cuales son evolucionados independientemente a través del método *complex competitive evolution*. Al final de cada paso de la calibración, los complejos se mezclan y se repite el proceso hasta alcanzar un criterio de convergencia.

TETIS incluye diversos criterios de rendimiento de la simulación. En este trabajo se han empleado tres: el sesgo o error en el volumen de caudal (11), el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (12) (Nash & Sutcliffe, 1970) y el coeficiente de Kling-Gupta (13) (Gupta, Kling, Yilmaz, & Martinez, 2009).

$$sesgo = \frac{V_o - V_s}{V_o} \cdot 100 [\%] \quad (11)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{o,t} - Q_{s,t})^2}{\sum_{t=1}^n (\bar{Q}_o - Q_{s,t})^2} \quad (12)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (13)$$

Donde V_o y V_s son respectivamente el volumen total de caudal observado y simulado, $Q_{o,t}$ y $Q_{s,t}$ son el caudal observado y simulado en el intervalo t , r el coeficiente de correlación lineal entre el caudal observado y simulado, α es el cociente entre la desviación estándar del caudal simulado y el observado, y β el cociente entre el caudal medio simulado y observado.

5.2. Datos de partida

Los datos de entrada del modelo TETIS incluyen series climáticas, series de aforo de caudal líquido y sólido en ríos, y mapas de ciertos parámetros del modelo.

Es en este punto donde se define la resolución temporal y espacial del modelo a través de la resolución temporal de las series y la resolución espacial de los mapas. En este estudio, la resolución temporal de las simulaciones es diaria, entendiéndose que ésta es una resolución que permite simular todos los procesos hidrológicos de interés para un análisis de recursos hídricos que requiere un tiempo de cálculo limitado. Bajo el mismo criterio, se ha adoptado una resolución espacial de 100 m, siendo éste tamaño de celda el más que pequeño que permitía unos tiempos de cálculo razonables, y entendiéndose que de cara a plantear medidas de actuación es necesaria la mayor resolución posible.

5.2.1. Clima

Como se muestra en la Figura 199, TETIS requiere tres series climáticas: precipitación, temperatura media y evapotranspiración potencial. Estas tres series han de tener la resolución temporal del modelo y se introducen como puntos a partir de los que el modelo interpola los *raster* diarios.

Además, el módulo de nieve requiere seis mapas de radiación correspondientes a los meses de enero a junio. Estos mapas contienen el cociente adimensional entre la radiación mensual incidente cuando se tiene en cuenta la topografía frente a la radiación incidente cuando se considera la zona de estudio como plana. Estos mapas fueron calculados mediante la herramienta *Area Solar Radiation* de ArcGIS.

Mientras que los mapas de radiación se consideran estables en el escenario de simulación de clima presente y clima pasado, no es así en el caso de la precipitación, temperatura y evapotranspiración. En los siguientes subapartados se explica el procedimiento aplicado para cada uno de los escenarios climáticos.

Clima presente (1985-2005)

Los datos diarios de precipitación y temperatura (máxima, media y mínima) han sido obtenidos de la base de datos de la AEMET. El número de pluviómetros y estaciones con datos de temperatura en los tres ámbitos de estudio se muestran en la Tabla (por ámbito de estudio se considera un área que excede al límite de las cuencas hidrográficas en 20 km).

Parque Nacional	Pluviómetros	Termómetros
Picos de Europa	59	33
Sierra de Guadarrama	95	46
Sierra Nevada	136	57

Tabla 3. Estaciones meteorológicas con datos de precipitación y temperatura media diaria en cada uno de los tres ámbitos de estudio.

La evapotranspiración potencial fue calculada mediante el método de Hargreaves-Samani (Hargreaves & Samani, 1985). La elección de este método se basó en la disponibilidad de datos climáticos, puesto que requiere únicamente de los valores diarios de temperatura (máxima, media y mínima) y de radiación solar extraterrestre (15). Los datos de temperatura se obtienen de las series observadas de la AEMET, y la radiación global extraterrestre se obtuvo a partir de la herramienta *Points Solar Radiation* de ArcGIS.

$$PET = \frac{0,0023}{\lambda} \cdot R_a \cdot (T_{max} - T_{min})^{0.5} \cdot (T_{med} + 17,8) \left[mm/d \right] \quad (14)$$

Donde PET es la evapotranspiración potencial, λ [MJ/kg] el calor latente de evaporación, y T_{max} , T_{min} y T_{med} son la temperatura máxima, mínima y media del día en °C.

Interpolación

TETIS sólo permite introducir datos climáticos en forma puntual, es decir, como estaciones meteorológicas. Puesto que es un modelo distribuido, internamente el programa hace una interpolación espacial a partir de los datos puntuales para crear el *raster* diario de precipitación, temperatura y evapotranspiración. El método utilizado en esta interpolación espacial es el inverso de la distancia al cuadrado, pudiendo incluir además un término que tiene en cuenta la posible correlación lineal entre la variable climática y la altitud (15).

$$X_i = \sum_{j=1}^n w_{i,j} [X_j + \beta(z_i - z_j)] \quad (15)$$

$$w_{i,j} = \frac{d_{i,j}^{-2}}{\sum_{k=1}^n d_{i,k}^{-2}}$$

Donde X_i es la variable interpolada, X_j la observación de la variable en la estación j , $w_{i,j}$ es el peso de la estación j en la interpolación del punto i , n es el número de estaciones desde las que interpolar, β es la pendiente de la correlación lineal entre la variable y la cota, z_i y z_j son las cotas del punto a interpolar y la estación, y $d_{i,j}$ es la distancia euclídea entre el punto a interpolar y la estación.

Se consideró que este tipo de interpolación era muy simplista y que un modelo distribuido se aprovecharía del uso de métodos de interpolación más desarrollados. Por ello se decidió explorar otros tipos de interpolación más complejos.

El primer paso de este análisis fue identificar qué variables auxiliares mostraban correlación con la precipitación o la temperatura. Para ellos se calculó la media anual de cada variable y estación y se estudió su correlación con una serie de variables auxiliares. Siguiendo otros trabajos de este grupo, se utilizaron como variables explicativas la altitud, la distancia al mar y la orientación. A partir de estas tres variables se construyeron las once combinaciones posibles de regresiones lineales simples y múltiples. Para cada una de las regresiones se calculó el error cuadrático medio, el coeficiente de determinación y el criterio de Akaike, estadísticos que permitieron seleccionar las regresiones que mayor variabilidad explican.

Sobre los residuos de dichas regresiones se procedió a analizar qué método de interpolación obtenía mejores resultados. Los métodos comparados fueron el inverso de la distancia al cuadrado, *universal kriging* y *ordinary kriging* (para el que se usaron los datos originales, en vez de los residuos de la regresión lineal) (Teegavarapu & Chandramouli, 2005). La selección del método de interpolación se hizo por medio de validación cruzada y el cálculo de cuatro estadísticos: error cuadrático medio, error residual medio, error absoluto medio y coeficiente de determinación.

El procedimiento anteriormente explicado es el aplicado de forma general tanto para la precipitación como para la temperatura. Sin embargo, cada una de estas variables tiene sus peculiaridades. Por un lado, en la precipitación es necesario interpolar la probabilidad de ocurrencia de precipitación; para ello se generaron series binarias de días secos (0) o lluviosos (1) y se interpoló dicha serie por medio de la inversa de la distancia al cuadrado; la validación cruzada permite establecer el umbral de probabilidad de precipitación a partir del cual considerar un día como seco o lluvioso. Por el otro lado, en la temperatura es necesario obtener mapas de máximas y mínimas diarias; el procedimiento aplicado fue interpolar la temperatura media diaria según el procedimiento general explicado anteriormente, y generar además un mapa del rango de variación diario de la temperatura (diferencia entre temperatura máxima y mínima); a partir de estos dos mapas se pueden crear los mapas de temperatura máxima y mínima.

En el caso de la evapotranspiración, el método de Hargreaves-Samani fue aplicado sobre los mapas de temperatura, habiendo obtenido primeramente el mapa de radiación solar extraterrestre de cada día del año. Por tanto, no fue necesario interpolar esta variable.

Clima futuro (2045-2065)

Se generaron series de las variables climáticas antes citadas (precipitación, temperatura y evapotranspiración) para el escenario de clima futuro, es decir, el periodo 2045-2065 bajo el escenario de cambio climático RCP8.5.

Se partió de la base de datos *Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEX-GDDP), desarrollada por la NASA. De esta base de datos se extrajo el *downscaling* estadístico de las proyecciones climáticas para 20 modelos globales del CMIP5 (ver Tabla) de las variables precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, con resolución temporal diaria y resolución espacial de 25 km.

Grupo	ID Instituto	Modelo
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) and Bureau of Meteorology (BOM), Australia	CSIRO-BOM	ACCESS1.0
Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	BCC	BCC-CSM1.1
College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University	GCESS	BNU-ESM
Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	CCCMA	CanESM2
National Center for Atmospheric Research	NCAR	CCSM4
Community Earth System Model Contributors	NSF-DOE-NCAR	CESM1(BGC)
Centre National de Recherches Météorologiques / Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Scientifique	CNRM-CERFACS	CNRM-CM5
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0
NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	NOAA GFDL	GFDL-CM3 GFDL-ESM2G GFDL-ESM2M
Institute for Numerical Mathematics	INM	INM-CM4
Institut Pierre-Simon Laplace	IPSL	IPSL-CM5A-MR IPSL-CM5B-LR
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies	MIROC	MIROC-ESM-CHEM
Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	MIROC	MIROC5
Max-Planck-Institut für Meteorologie (Max Planck Institute for Meteorology)	MPI-M	MPI-ESM-MR MPI-ESM-LR
Meteorological Research Institute	MRI	MRI-CGCM3
Norwegian Climate Centre	NCC	NorESM1-M

Tabla 4. Listado de modelos globales de proyección climática del CMIP5 utilizados en este estudio y la institución que los publica.

Los resultados de las proyecciones de los GCM en ocasiones difieren mucho de la realidad. Por ello, en vez de utilizar los resultados de las proyecciones directamente como entrada de los modelos hidrológicos, es recomendable extraer las tendencias de los resultados de los propios modelos en base a un periodo de referencia, para más tarde aplicar dichas tendencias a los datos instrumentales (Tabor & Williams, 2010). Es precisamente ésa metodología, a escala diaria, la que se ha sido aplicada en el presente estudio, utilizando

como periodo de referencia para la línea base los años 1985- 2005 y como periodo objetivo los años 2045-2065.

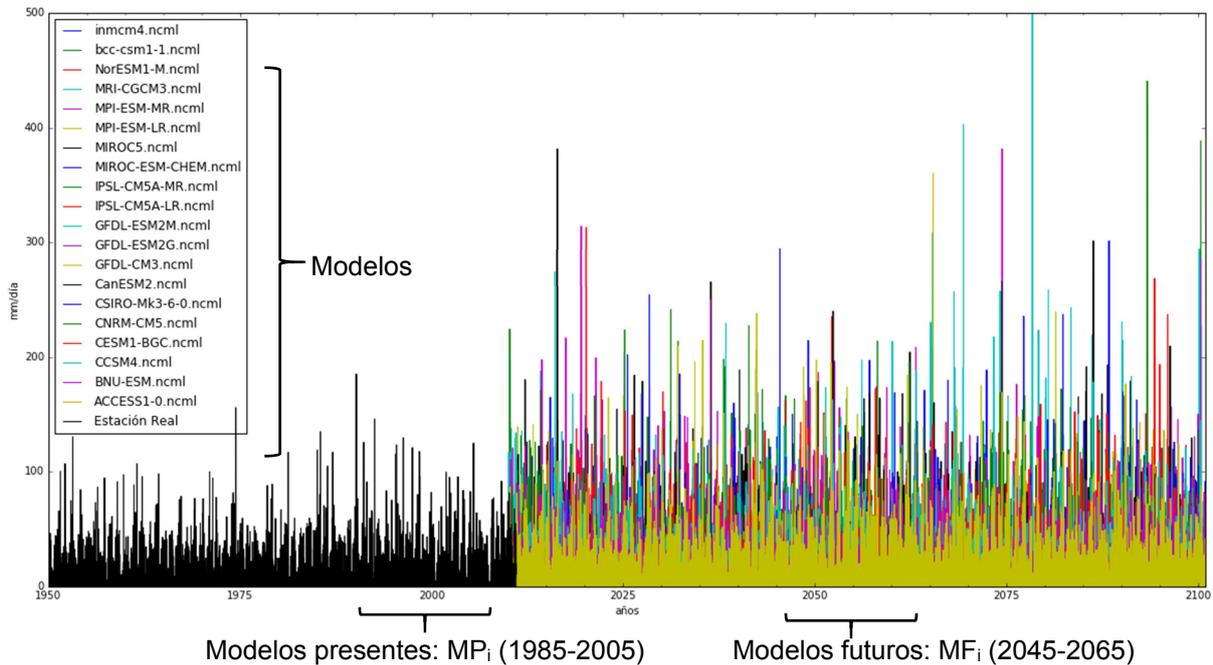


Figura 20. Esquema del método de generación de las series climáticas futuras.

Para crear una predicción única a partir de los 20 modelos extraídos del NEX-GDDP, se empleó el método de *ensemble* REA (*Reliability Ensemble Averaging*) (Tebaldi & Knutti, 2007). Este método penaliza aquellos modelos estadísticamente más alejados de nuestras series observadas, otorgando pesos a cada modelo (w_i) en función de la proporción de la raíz del error cuadrático medio ($RMSE$) que dicho modelo representa sobre el total de los modelos (17).

$$w_i = 1 - \frac{RMSE_i}{\sum_{m=1}^{20} RMSE_m} = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{t=1}^n (MP_{i,t} - S_{pre,t})^2 / n}}{\sum_{m=1}^{20} \sqrt{\sum_{t=1}^n (MP_{m,t} - S_{pre,t})^2 / n}} \quad (16)$$

Donde $MP_{i,t}$ es el valor estimado por el modelo presente i en el momento t , y $S_{pre,t}$ es el valor observado en la serie presente en el momento t .

La serie climática futura se ha generado aplicando el método delta de corrección de sesgo (Graham, Andréasson, & Carlsson, 2007), que regionaliza la base de datos NEX-GDPP a nuestra zona de estudio. La serie futura (S_{fut}) se obtiene directamente a partir de la serie presente (S_{pre}) aplicándole un factor de cambio (Δ_{REA}) (20). El factor de cambio se obtiene de la relación entre la predicción del modelo de la variable en el futuro (MF_i) y la predicción en el presente (MP_i), afectado por el peso obtenido para dicho modelo por el método REA (18).

$$S_{fut} = S_{pre} \cdot \Delta_{REA} \quad (17)$$

$$\Delta_{REA} = \sum_{i=1}^{20} \frac{MF_i}{MP_i} \cdot w_i \quad (18)$$

Mediante esta metodología se obtuvieron las series de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima en el periodo 2045-2065 en los mismos puntos en los que se disponía de observaciones en el clima presente. Sobre estas series futuras se aplicaron los mismos métodos aplicados a las series observadas para interpolar *raster* diarios de cada una de las variables y el método de Hargreaves-Samani para generar los *raster* de evapotranspiración potencial diaria.

El método de obtención de las series climáticas del escenario futuro es distinto en el modelo de Sierra Nevada. Viene explicado en Pérez-Palazón (2018).

5.2.2. Aforos

Los aforos de caudal se obtuvieron de la base de datos del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (CEDEX, 2016). Esta base de datos proporciona las series históricas hasta septiembre de 2014 en todas las estaciones de la ROEA (Red Oficial de Estaciones de Aforo), dependiente del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. En el caso de Sierra Nevada, donde la vertiente sur de la cordillera pertenece a la demarcación de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas (y por tanto no dependiente del ministerio), los datos de caudal se obtuvieron de la base de datos de la red Hidrosur. Ambas bases de datos proporcionan para las estaciones en ríos los datos de nivel y caudal medio diario, mientras que en los embalses proporcionan el volumen embalsado y el caudal medio diario desembalsado, datos a partir de los cuales se calcula por balance el caudal medio de entrada.

Para el cálculo del caudal de sedimento se partió de los datos de la red SAICA (Sistema Automático de Información de Calidad de las Agua) de cada una de las confederaciones hidrográficas implicadas: C.H. Cantábrico en Picos de Europa, C.H. Duero en la Sierra de Guadarrama (puesto que la C.H. Tajo no dispone de estaciones de calidad de agua cercanas a la zona de estudio), y C.H. Guadalquivir para Sierra Nevada. Esta base de datos contiene datos quinceminutales de nivel, caudal y una serie de variables de calidad del agua, de las cuales es de interés únicamente la turbidez.

Para convertir los datos de turbidez ($NTU[-]$) y caudal líquido ($Q[m^3/s]$) en caudal de sedimento es necesario convertir la turbidez en sólidos totales en suspensión (TSS) a través la relación exponencial entre estas dos variables (19) (Holliday, Rasmussen, & Miller, 2003). Posteriormente se calcula el caudal de sedimento (Q_{sed}) a partir del caudal líquido y la densidad del sedimento ($\rho_{sed} = 1750 \text{ kg/m}^3$) (20).

$$TSS = \left(\frac{NTU}{0.4833} \right)^{\frac{1}{1.012}} \cdot 10^{-3} \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (19)$$

$$Q_{sed} = \frac{TSS \cdot Q}{\rho_{sed}} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (20)$$

La Tabla resume el número de estaciones de aforo en ríos, embalses y estaciones de sedimento disponibles en los tres ámbitos de estudio.

Parque Nacional	Caudal		Sedimento
	Ríos	Embalses	Ríos
Picos de Europa	11	0	1
Sierra de Guadarrama	15	8	1
Sierra Nevada			

Tabla 5. Estaciones en ríos y embalses con datos diarios de caudal o sedimento en los tres ámbitos de estudio.

5.2.3. Cartografía

El modelo TETIS requiere datos cartográficos que pueden clasificarse en cuatro grupos: topografía e hidrografía, características hidráulicas del suelo, uso del suelo, y erosionabilidad. Todos los mapas necesarios y la fuente de los datos se enumeran en la Tabla .

Tipo	Mapa	Descripción	Unidad	Fuente
Topografía e hidrografía	dem	Modelo digital de elevaciones	m	1
	fdir	Direcciones de flujo	-	5
	acum	Celdas drenantes acumuladas	-	5
	slope	Pendiente	m/m	5
Hidráulica del suelo	vel	Velocidad del flujo en ladera	m/s	5
	H _u	Almacenamiento capilar del suelo	mm	2, 3
	K _s	Conductividad hidráulica saturada del suelo superficial	mm/h	2, 3
	K _p	Conductividad hidráulica vertical de la zona vadosa	mm/h	2, 3
	K _{ps}	Conductividad hidráulica vertical del acuífero	mm/h	2, 3
	K _{ss}	Conductividad hidráulica horizontal de la zona vadosa	mm/h	2, 3
Uso del suelo	K _{sa}	Conductividad hidráulica horizontal del acuífero	mm/h	2, 3
	cobveg	Códigos con los usos del suelo especificados	-	5
Erosión	sand	Contenido de área del suelo superficial	%	4
	silt	Contenido de limo del suelo superficial	%	4
	clay	Contenido de arcilla del suelo superficial	%	4
	usle-C	Factor de cultivo del modelo USLE	-	5
	usle-K	Factor de erosionabilidad del modelo USLE	-	5
	usle-P	Factor de prácticas de conservación del modelo USLE	-	-

¹ CNIG; ² EU-SoilHydroGrids v1.0; ³ SoilGrids250m; ⁴ HWSD; ⁵ elaboración propia

Tabla 6. Mapas de topografía e hidrografía requeridos por el modelo TETIS.

Topografía e hidrografía

Para el trazado de la red hidrográfica y el cálculo de variables topográficas se partió del modelo digital de elevaciones de resolución 25 m del CNIG (Centro Nacional de Información Geográfica). Este MDT se remuestreó a la resolución del modelo (100 m) y a partir de él, utilizando las herramientas de *Arc Hydro Tools* de ArcGIS, se generaron los mapas necesarios.

Características hidráulicas del suelo

TETIS requiere los seis parámetros de conductividad del suelo indicados en la Tabla . De ellos, el primero (H_u) corresponde a un almacenamiento, el agua almacenada en el suelo capaz de ser extraída por la vegetación, y los otros cinco (K_x) corresponden a valores de conductividad hidráulica saturada vertical u horizontal en las tres capas de suelo que distingue el modelo.

Para la obtención de estos parámetros se utilizaron dos bases de datos de suelos: la base de datos europea 3D de hidráulica de suelos (EU-SoilHydroGrids v1.0) (Tóth, Weynants, Pásztor, & Hengl, 2017), y la base mundial de suelos SoilGrids250m (Hengl et al., 2017). Ambas bases de datos son compatibles al tener una estructura muy similar. Tienen una resolución espacial de 250 m y una desagregación de la columna de suelo en 7 capas hasta una profundidad máxima de 2 m. De las múltiples variables que ambas ofrecen se han utilizado únicamente la conductividad hidráulica, la capacidad de campo ($FC [-]$) y el punto de marchitez ($WP [-]$). Los mapas de conductividad hidráulica se extrajeron directamente de la base de datos, mientras que para el mapa de almacenamiento capilar se calculó a partir de la capacidad de agua disponible para la vegetación ($AWC [-]$) y la profundidad efectiva de las raíces ($R_d [mm]$) (21). El mapa de profundidad efectiva de las raíces se creó a partir del mapa de cobertura vegetal (ver siguiente subapartado), asignando a cada tipo de vegetación una profundidad fija (ver Tabla).

$$H_u = AWC \cdot R_d = (FC - WP) \cdot R_d \quad (21)$$

Cobertura de vegetación

Ver apartado: Modelización de cambios en el paisaje.

Erosionabilidad del suelo

Los datos de textura del suelo se extrajeron de la base de datos HWSD (*Harmonized World Soil Database*) (FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC, 2012). HWSD es una base de datos vectorial con datos del porcentaje de cada tipo de suelo, contenido de materia orgánica, drenaje, textura, etc.

El mapa del factor C del modelo USLE, dependiente del tipo de vegetación, se derivó directamente desde el mapa de cobertura de vegetación a partir de un valor fijo para cada tipo de cobertura (ver Tabla).

El mapa del factor K, dependiente de la textura y contenido de materia orgánica del suelo, se obtuvo mediante la ecuación (22); para ello se utilizaron los datos de la base de datos HWSD.

$$100 \cdot K = 2,7 \cdot 10^{-4} \cdot M^{1,14} \cdot (12 - OC) + 4,2 \cdot (b - 2) + 3,2 \cdot (c - 3) \quad (22)$$

$$M = Clay \cdot (Silt + Sand)$$

Donde M es un factor de textura, OC [%] es el contenido de materia orgánica, b es un valor dependiente de la estructura del suelo, y c la clase de permeabilidad del perfil. Todos estos valores están incluidos en HWSD, debiendo reclasificar los datos de textura y permeabilidad para obtener los valores de b y c .

Ante la falta de datos sobre prácticas de conservación del suelo, el mapa del factor P tiene un valor constante de 1.

Cod	ETR / ETP												I	usle-C	Rd
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic			
1	0,3	0,3	0,85	0,95	0,95	0,95	0,95	0,9	0,9	0,7	0,65	0,3	2	0,0001	3,700
2	0,3	0,3	0,8	0,85	0,85	0,9	0,9	0,85	0,85	0,65	0,6	0,3	1,8	0,00150	3,048
3	0,6	0,6	0,65	0,7	0,7	0,75	0,75	0,75	0,7	0,7	0,65	0,6	1,3	0,04581	2,450
4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,5	0,5	0,5	1,5	0,02960	1,915
5	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,5	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	1	0,07085	1,050
6	0,2	0,2	0,2	0,4	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,4	0,2	0,5	0,27440	0,910
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

1: bosque frondosas maduras; 2: bosque frondosas; 3: bosque coníferas; 4: matorral; 5: pastizal; 6: cultivos agrícolas; 7: suelo desnudo; 8: suelo antrópico; 9: cuerpos de agua

Tabla 7. Parámetros de cada tipo de vegetación: cociente mensual de la evapotranspiración real y potencial (ETR/ETP), interceptación máxima (I [mm]), factor C del USLE (usle-C) y profundidad de las raíces (Rd [m]).

5.3. Fases del modelado

La creación de todo modelo hidrológico conlleva como mínimo tres fases: calibración, validación y simulación. Las particularidades de este estudio hacen que estas tres fases se vean incrementadas a cinco al duplicarse tanto la calibración como la validación. Por un lado, son necesarias dos validaciones independientes para el modelo hidrológico y el modelo de sedimentos. Por el otro lado, son necesarias dos simulaciones correspondientes a los dos escenarios climáticos de estudio.

La Tabla especifica las características de estas cinco fases para los modelos de Picos de Europa y Sierra de Guadarrama. Se muestran los años hidrológicos utilizados en cada una de las fases, las cuencas de estudio y el número de estaciones analizadas. Las estaciones se disgregan en 'caudal', para aquellas con series observadas de caudal, 'sedimento', para aquellas con series de caudal sólido, y 'control', aquellas sin observaciones, pero para las que se quieren obtener resultados. Si bien los periodos de simulación son idénticos en ambas ubicaciones, los periodos de calibración y simulación han sido escogidos en función de los datos disponibles. En esta elección han sido especialmente limitantes los datos de caudal sólido.

Parque nacional	Fase	Periodo	Cuencas	Estaciones		
				Caudal	Sedimento	Control
Picos de Europa	Calibración caudal	2008-2014		4	-	-
	Calibración sedimento	2008-2014		-	1	-
	Validación	2000-2008	4	11	1	-
	Simulación clima actual	1985-2005		11	1	38
	Simulación clima futuro	2045-2065		-	-	49
Sierra de Guadarrama	Calibración caudal	2001-2006		8	-	-
	Calibración sedimento	2009-2010		-	1	-
	Validación	1994-2000	8	16	1	-
	Simulación clima actual	1985-2005		16	1	49
	Simulación clima futuro	2045-2065		-	-	65

Tabla 8. Resultados de la calibración y validación de los modelos de caudal.

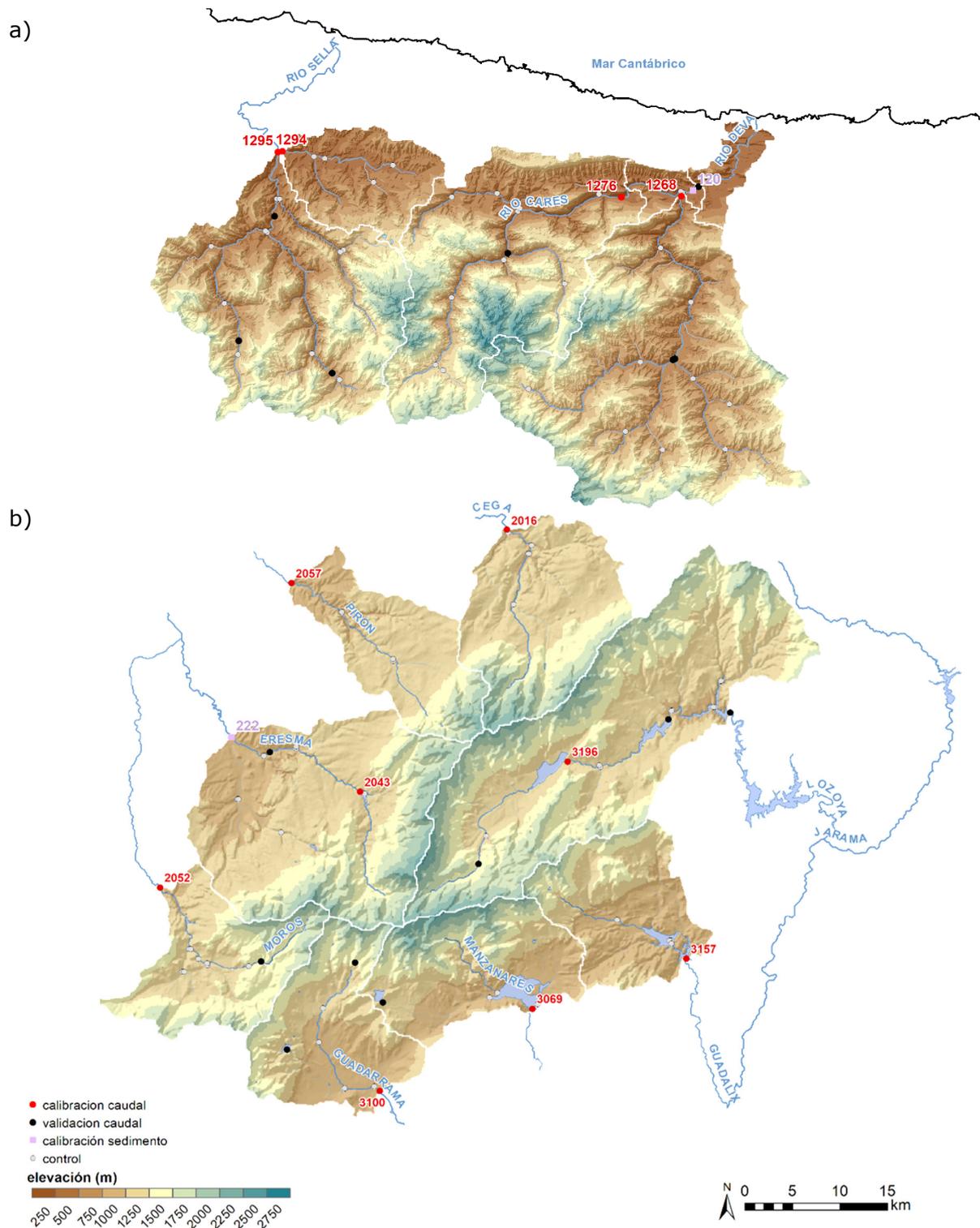


Figura 21. Cuencas modeladas en los parques nacionales de Picos de Europa (a) y Sierra de Guadarrama (b). Se muestran los puntos utilizados en la calibración, validación y simulación.

En la Figura se muestra el ámbito de estudio de estos dos parques, junto con las cuencas hidrográficas modeladas y los puntos utilizados en cada una de las fases. El área de estudio de Picos de Europa (1785 km²) se divide en cuatro subcuencas, con sus cuatro respectivas estaciones de aforo en sus puntos de cierre: Sella (1295), Güeña (1294), Cares (1276) y Deva (1268). Todas ellas son cuencas pertenecientes a la Confederación Hidrográfica del Cantábrico. El modelo de la Sierra de Guadarrama (2556 km²) es relativamente más complejo; se subdivide en ocho subcuencas, cuatro de las cuales pertenecen a la cuenca del Duero (Cega, Pirón, Eresma y Moros), y otras cuatro pertenecen a la cuenca del Tajo (Guadarrama, Manzanares, Guadalix y Lozoya). La existencia de numerosos embalses complica la simulación del régimen hidrológico natural y la producción de sedimentos. Es por ello que las estaciones de calibración de alguna de las cuencas no están en el punto de cierre, sino en el embalse más aguas arriba en la cuenca.

5.4. Resultados

5.4.1. Calibración de los parámetros

En la Tabla se muestran los resultados de la calibración de los factores correctores y los parámetros susceptibles de calibración del modelo. Se incluyen, en aquellos casos en los que existen, los rangos posibles de variación de cada uno de los parámetros.

Factor	Descripción	Rango		PdE	SdG
		mín.	máx.		
FC ₁	Almacenamiento capilar	0,01	3	2.919	0.532
FC ₂	Evaporación	0	2	1.482	1.909
FC ₃	Infiltración	0	1,5	0.963	0.133
FC ₄	Escorrentía directa	0,001	10	1*	0.102
FC ₅	Percolación	0	1,5	0.4*	0.0127
FC ₆	Flujo subsuperficial	0,001	5000	10*	0.906
FC ₇	Pérdidas subterráneas	0	0,5	0	2.670
FC ₈	Flujo base	0,001	50000	200*	0.985
FC ₉	Velocidad del flujo	0	1,5	1*	1.608
FC ₀	Precipitación	0	2	1*	1*
β_{nieve}	Coef. de la interpolación de la altura de nieve con la cota	0	10	1	1
DDF ₁	Coeficiente de fusión de nieve sin lluvia	1	3	5.499	5.646
DDF ₂	Coeficiente de fusión de nieve con lluvia	3	6	5.880	7.814
T _b	Temperatura base de fusión de la nieve	-2	4	3.524	2.475
β_{ppt}	Coef. de la interpolación de la precipitación con la cota	-0,2	0,2	0.0012	0.0012
USLE ₁	Erosión en ladera	-	-	97.5	1000
USLE ₂	Capacidad de transporte de sedimentos en cárcavas	-	-	154.2	278.5
USLE ₃	Capacidad de transporte de sedimentos en cauce	-	-	5,5 ^{·10⁻⁴}	9.195
p ₁	Exponente para la ec. de infiltración al tanque estático	0	3	0	0.492
H3 _{max}	Capacidad máxima del tanque gravitacional como % de H _u	0	10 ⁶	10 ^{5*}	10 ^{5*}

* Valor por defecto del parámetro

Tabla 9. Valor calibrado de los parámetros del modelo hidrológico TETIS. Se incluye su rango de variación y el valor optimizado para cada ubicación (PdE: Picos de Europa, SdG: Sierra de Guadarrama).

El primer comentario sobre la calibración de los parámetros es la mayor complejidad de la calibración del modelo de Sierra de Guadarrama. Se demuestra por la necesidad de calibrar todos los parámetros del modelo menos dos para obtener un rendimiento óptimo en la calibración. Por su parte, la calibración de Picos de Europa obtuvo un rendimiento óptimo sin necesidad de calibrar 7 de los parámetros. Dos hechos explicarían la mayor complejidad del modelo de Guadarrama. El primero es la existencia de numerosos embalses y azudes, que modifican el régimen hidrológico haciendo difícil que la simulación en régimen natural represente los valores observados. El segundo es la diferencia en la topografía y vegetación

entre la vertiente norte de la Sierra (Duero) y la vertiente sur (Tajo); al calibrar conjuntamente las 8 subcuencas, la calibración obtiene parámetros que no son los óptimos para cada cuenca, sino para el conjunto del modelo. Por su parte, todas las cuencas de Picos de Europa corresponden a la vertiente norte de la Cordillera Cantábrica, con lo que el clima y la distribución de la vegetación son más similares entre ellas.

El segundo comentario sobre la calibración es la disparidad de resultados entre ambos modelos. Es complicado dar un sentido físico a los parámetros efectivos obtenidos de la calibración, puesto que son únicamente los valores que producen un mejor rendimiento del modelo, y no por ello representan mejor los procesos que acontecen en la cuenca. Teniendo esta cautela en cuenta, es interesante el hecho de que algunos submodelos tengan valores de los parámetros muy próximos en ambas ubicaciones y otros submodelos valores muy dispares. Como ejemplo, los parámetros del submodelo de nieve (DDF_1 , DDF_2 y T_b) tienen valores muy similares en ambos modelos, en los tres casos próximos al valor superior del rango de variación. Por el contrario, los parámetros del proceso de infiltración y generación de escorrentía (FC_3 - FC_8) tienen valores que difieren en órdenes de magnitud. Dándole un sentido físico a estos datos, la muy diferente litología y distribución de precipitaciones entre la Cordillera Cantábrica y el Sistema Central, y la complejidad de su simulación, explicarían el contraste entre los valores del modelo de infiltración, mientras que la ablación de la nieve es un proceso más simple desde el punto de vista físico y menos dependiente de la ubicación geográfica.

5.4.2. Rendimiento del modelo

Modelo hidrológico

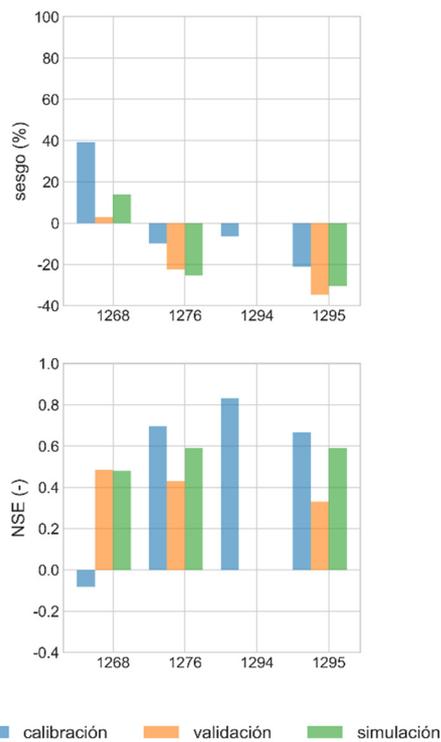
El rendimiento de la simulación hidrológica con respecto a las observaciones en las fases de calibración, validación y simulación en clima actual se muestra en la Figura 22. Se muestran los valores de sesgo (o porcentaje de error en el caudal total) y el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) para los parques de Picos de Europa y Sierra de Guadarrama.

Picos de Europa

La calibración del modelo hidrológico de Picos de Europa obtuvo, en general, un rendimiento óptimo, son un sesgo inferior al 20% y un NSE por encima de 0,60. La excepción es la cuenca del Deva (estación 1268), para la que se obtuvo un sesgo del 40% de error y un NSE negativo.

Como es lógico, se produce una pérdida del rendimiento tanto en la validación como en la simulación. Esta pérdida está en rangos asumibles, con valores de NSE próximos a 0,40 en la validación, e iguales o superiores a 0,50 en la simulación. Sorprende el mayor rendimiento de la simulación frente a la validación. Reseñar que la cuenca del Güeña (estación 1294) no tiene valores de rendimiento para la simulación ni la validación porque esta estación fue instalada en 2011, es decir, fuera de los periodos de validación y simulación.

a) Picos de Europa



b) Sierra de Guadarrama

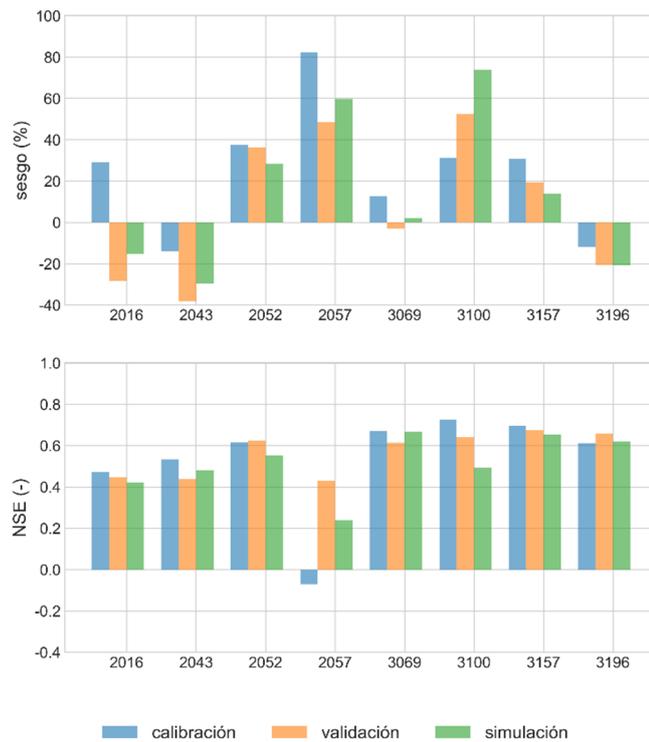


Figura 22. Rendimiento de la simulación hidrológica en la calibración, validación y simulación para Picos de Europa (a) y Sierra de Guadarrama (b) (sesgo: error en el caudal total, NSE: coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe de la serie mensual).

Sierra de Guadarrama

Como se comentó anteriormente, este modelo es más complejo por el número de cuencas y la variabilidad entre las vertientes norte y sur de la sierra. De forma generalizada, se aprecia un peor rendimiento en las cuencas del Duero (2016, 2043, 2052 y 2057) que en las cuencas del Tajo (3069, 3100, 3157, 3196). Mientras que las cuencas del Tajo muestran NSE por encima de 0,6 en todos los casos menos uno, las estaciones del Duero tienen rendimientos ligeramente superiores al 0,4 de NSE.

El modelo es incapaz de simular correctamente la cuenca del Pirón (estación 2057), para la que se obtiene un sesgo del 50% o superior en las tres fases y un NSE bajo, incluso negativo en la calibración. Se trató de corregir este problema creando un modelo específico para esta cuenca, es decir, calibrando únicamente a la estación 2057; incluso así se obtuvieron rendimientos pobres. Esto nos lleva a pensar que hay alguna característica de esta cuenca que no tenemos caracterizada, como pudieran ser azudes de cierta capacidad de regulación, derivaciones para riego u otros usos, o zonas de infiltración elevada.

La pérdida de rendimiento en la validación y la simulación es, por lo general, muy baja, con casos en los que alguna de estas dos fases supera el rendimiento de la calibración.

Como ejemplos de hidrogramas simulados en clima actual, la Figura compara el caudal observado frente al simulado en las estaciones 1276 (río Cares, Picos de Europa) y 3069 (río Manzanares, Sierra de Guadarrama). En ambos casos el hidrograma representa correctamente la estacionalidad del régimen de caudal, así como los pequeños eventos de

crecida y la recesión del caudal tras estos eventos. Sin embargo, el modelo es incapaz de reproducir fielmente los picos de inundación, especialmente en el caso del Manzanares, donde el régimen es más torrencial. Éste es un defecto habitual de los modelos hidrológicos, potenciado por la calibración al NSE, el cual prima el acuerdo general del hidrograma sobre el valor medio de caudal frente a la representación de los extremos.

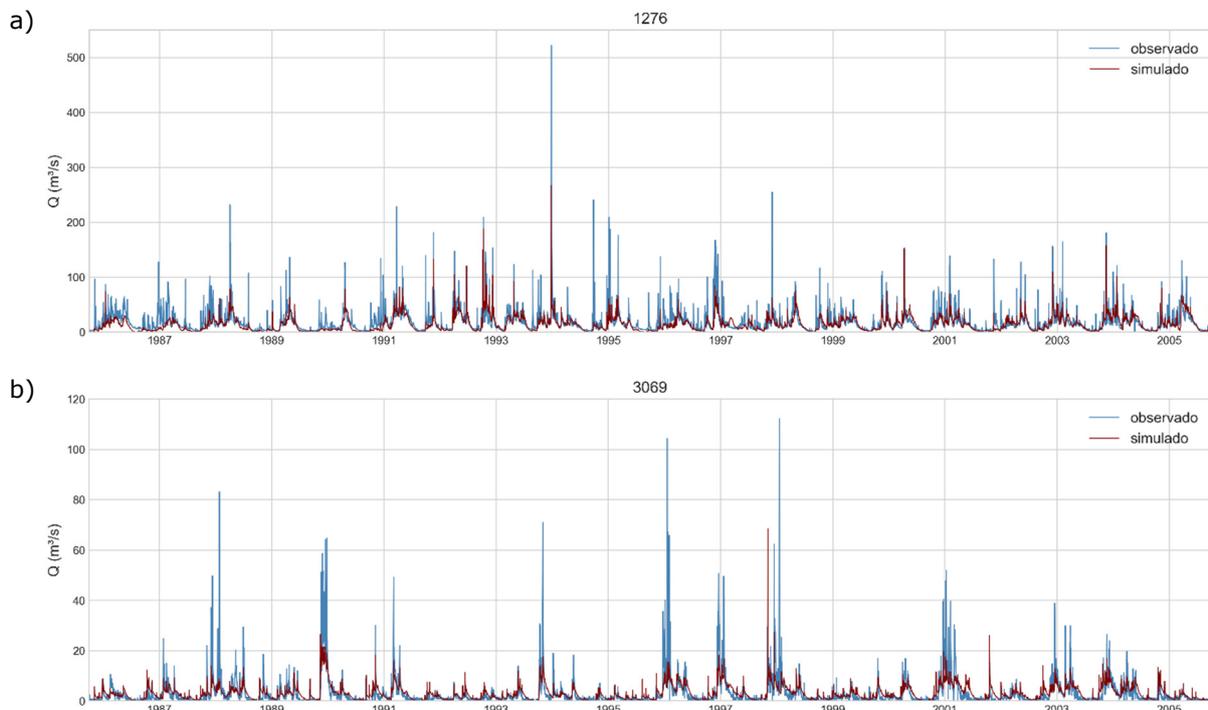


Figura 23. Comparación del hidrograma diario observado y el simulado para el escenario de clima actual: a) estación 1276 en el río Cares (Picos de Europa) y b) estación 3069 en el río Manzanares (Sierra de Guadarrama).

Modelo de erosión

El rendimiento de la simulación de caudal de sedimento se muestra en la Tabla . Se incluyen los valores para la calibración y la validación en las dos únicas estaciones con aforo de calidad de agua en los dos parques.

	estación	río	periodo	calibración sesgo (%)	NSE (-)	periodo	validación sesgo (%)	NSE (-)
Picos de Europa	120	Deva	2008-12	-65,2	0,18	2007-08	-69,6	0,0
Sierra de Guadarrama	222	Eresma	2009-10	542,1	-538,6	2006-14	34,6	-5,33

Tabla 10. Rendimiento de la simulación del caudal de sedimento en la calibración y validación para Picos de Europa y Sierra de Guadarrama (sesgo: error en el caudal de sedimento total, NSE: coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe de la serie mensual).

El rendimiento del modelo es pobre, con sesgos elevados y valores del NSE negativos en algunos casos. Estos bajos valores en relación con la simulación hidrológica son habituales en la simulación de sedimentos; se debe a la aplicación a la escala de cuenca de un método como el USLE, creado para parcelas agrícolas, y a la escasez y mala calidad de datos de sedimento transportado por los ríos.

Con un rendimiento tan pobre no se pueden hacer valoraciones cuantitativas en cuanto a la producción de sedimento. Sí se puede comparar cualitativamente la producción de sedimento en el escenario actual y el escenario futuro.

La Figura muestra los sedimentogramas diarios de las dos estaciones calibradas para todo el periodo con observaciones. Se comprueba de nuevo la incapacidad del modelo de reproducir la dinámica de sedimentos. El modelo de Picos de Europa reproduce de forma más fiel las épocas con más caudal sólido, pero es incapaz de reproducir la gran mayoría de picos. El modelo de la Sierra de Guadarrama reproduce un caudal nulo salpicado de picos de excesiva magnitud.

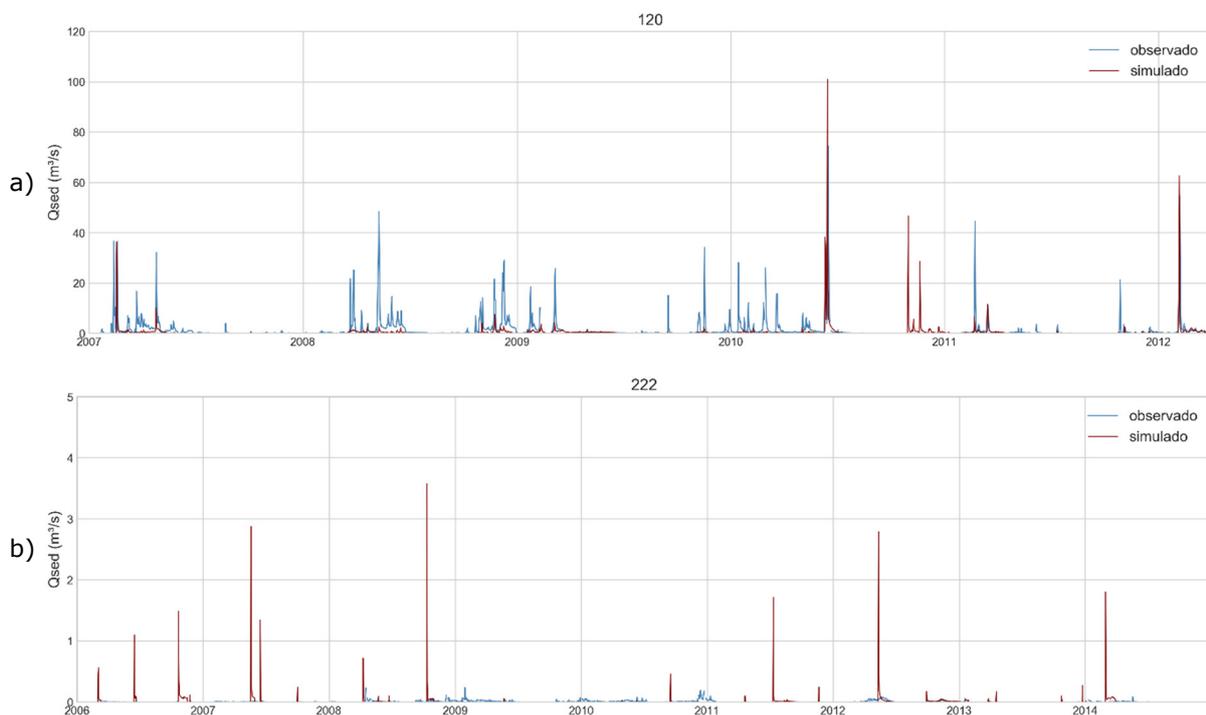


Figura 24. Comparación del sedimentograma diario observado y el simulado para el escenario de clima actual: a) estación 120 en el río Deva (Picos de Europa) y b) estación 222 en el río Eresma (Sierra de Guadarrama).

5.4.3. Hidrología

Clima

La Figura muestra la comparativa entre el clima predicho para el escenario 2045-2065 en el escenario RCP8.5 y el clima observado en el periodo 1985-2005. De las cuatro variables, sólo la temperatura media anual (c) fue obtenida directamente de los modelos de cambio climático a través de la metodología explicada en el apartado 5.2.1 La separación de la precipitación en forma lluvia (a) o nieve (b) se obtiene en TETIS a partir de las series de precipitación y temperatura. La media de la evapotranspiración real diaria se obtiene en TETIS al aplicar el coeficiente estacional de cultivo a la serie de evapotranspiración potencial calculada mediante el método de Hargreaves-Samani (apartado 5.2.1). Valores negativos representan un descenso en dicha variable en el escenario futuro, mientras que valores positivos representan un aumento.

En **Picos de Europa** se predice un descenso general de la precipitación (mapas a y b agregados). Si bien en el mapa de precipitación líquida aparece un aumento de ésta en las cumbres de los tres macizos, esto se debe a que buena parte de la precipitación a estas cotas se producirá en el futuro en forma de lluvia en vez de nieve, como consecuencia del aumento de la temperatura. Si se compara el rango de incremento de la precipitación líquida en estos puntos (en torno a 100 mm) frente al de pérdida de la precipitación en forma de nieve (por encima de 200 mm), se comprueba que toda el área del parque tendrá una reducción de la precipitación, más acentuada en cotas bajas.

Se predice también un incremento de la temperatura media por encima de 1,5 °C en gran parte del parque. El aumento es más marcado en la parte central, la más elevada, donde se estima en torno a los 2 °C. Parcialmente ligado a este incremento de la temperatura media está el aumento de la evapotranspiración en el entorno al milímetro diario en un alto porcentaje del área del parque. Este aumento está exacerbado por el cambio en la vegetación predicho para el escenario futuro, donde se estima un aumento notable de la extensión de los bosques, formación que produce una mayor evapotranspiración.

En la **Sierra de Guadarrama** la precipitación muestra tendencias contrarias según la vertiente. En las zonas bajas de las cuencas del Duero (sector noroeste del ámbito de estudio) se estima un aumento de la precipitación anual de hasta 100 mm. Por el contrario, en la vertiente sur se estiman pérdidas de precipitación, especialmente notables en los valles del Lozoya y Guadarrama, donde se superan los 300 mm de reducción. En cuanto a la precipitación en forma de nieve, se predicen pérdidas de hasta 250 mm, lo cual supone la práctica desaparición de la nieve en la sierra, puesto que la precipitación en forma de nieve en clima actual tiene máximos de 300 mm.

El incremento de la temperatura es más marcado que en Picos de Europa. El incremento mínimo se da en las cimas, con valores ya por encima de los 2 °C, y el máximo se da en el valle de Guadarrama, donde se acerca a los 3°C. Este incremento de la temperatura no se traduce, en cambio, en un aumento de la evapotranspiración tan intenso como ocurre en Picos de Europa. Esto es debido a que la predicción del cambio de la vegetación es mucho más limitada, con lo que el incremento es únicamente debido a la mayor evaporación causada por el aumento de la temperatura.

En la Figura se muestran mapas similares para el P.N. de Sierra Nevada. Se incluyen los mapas con las medias anuales de precipitación, temperatura y precipitación en forma de nieve. La precipitación en forma de lluvia sufrirá una pérdida de hasta el 40% (400 mm); esta pérdida es más acusada en la ladera sur, donde actualmente hay más precipitación. La precipitación en forma de nieve sufre también un descenso acusado de hasta el 40% en las zonas más altas. La superficie afectada por la nieve se reduce, en su mayor parte en el río Fardes. Se observa un ligero aumento de la cota mínima a la que aparece nieve. La temperatura media anual muestra tendencias contrarias. La zona este, la más cálida, muestra un descenso de menos de 1°C en la temperatura media. La cuenca del río grande, en la ladera sur, también muestra un descenso de la temperatura media anual, en algunos casos de más de un grado. Por el contrario, las cuencas del Genil, Fardes y Guadalfeo sufrirán un aumento de la temperatura media, en la mayor parte de la cuenca entre 0 y 2 grados, pero con picos de hasta 6 °C en la cuenca del Genil.

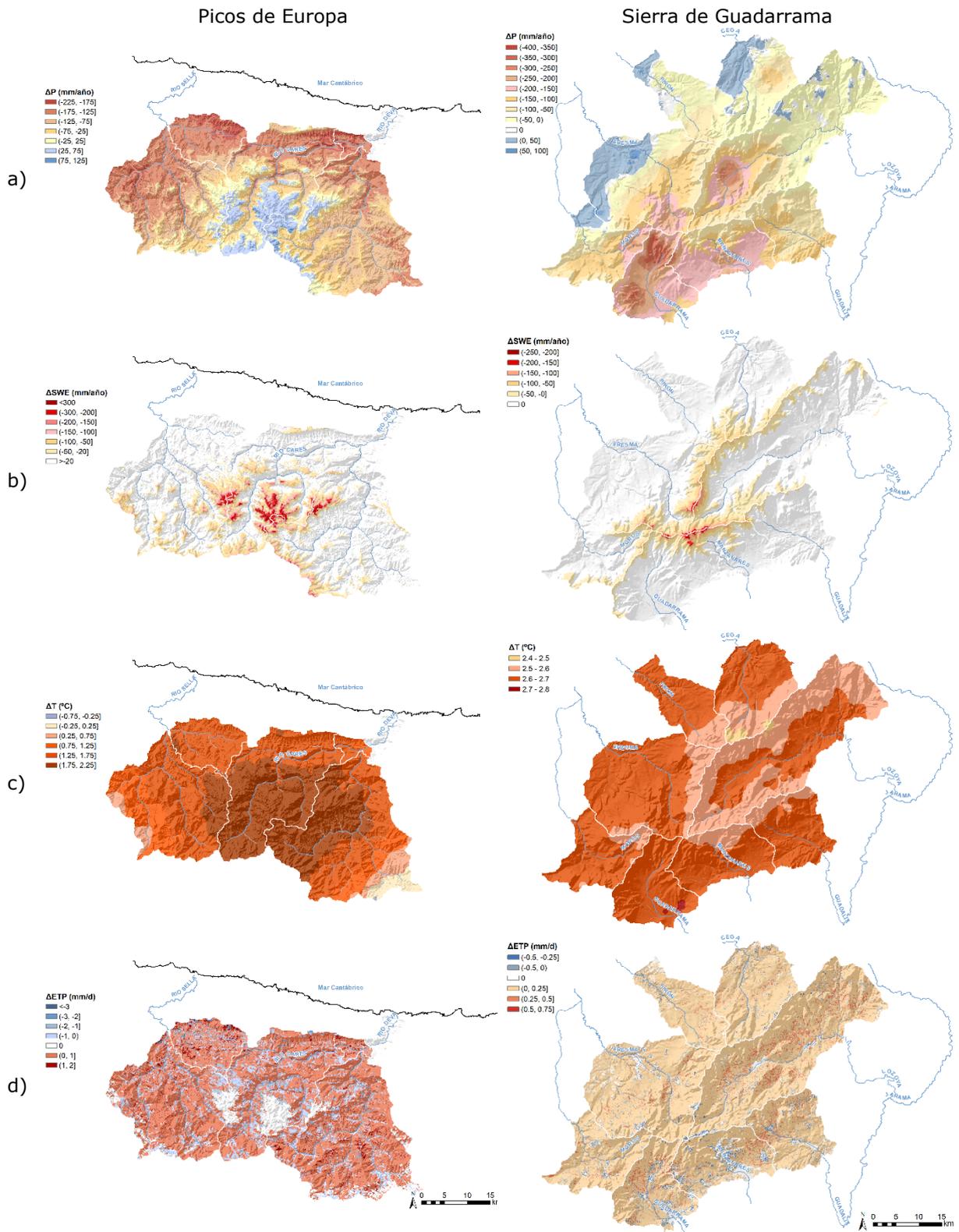


Figura 25. Variación en los PP.NN. de Picos de Europa (izda.) y Sierra de Guadarrama (dcha.) de cuatro variables climáticas entre el clima predicho para el periodo 2045-2065 en el escenario RCP8.5 y el clima actual: a) precipitación anual en forma de lluvia, b) precipitación anual en forma de nieve, c) temperatura media anual, d) evapotranspiración media diaria.

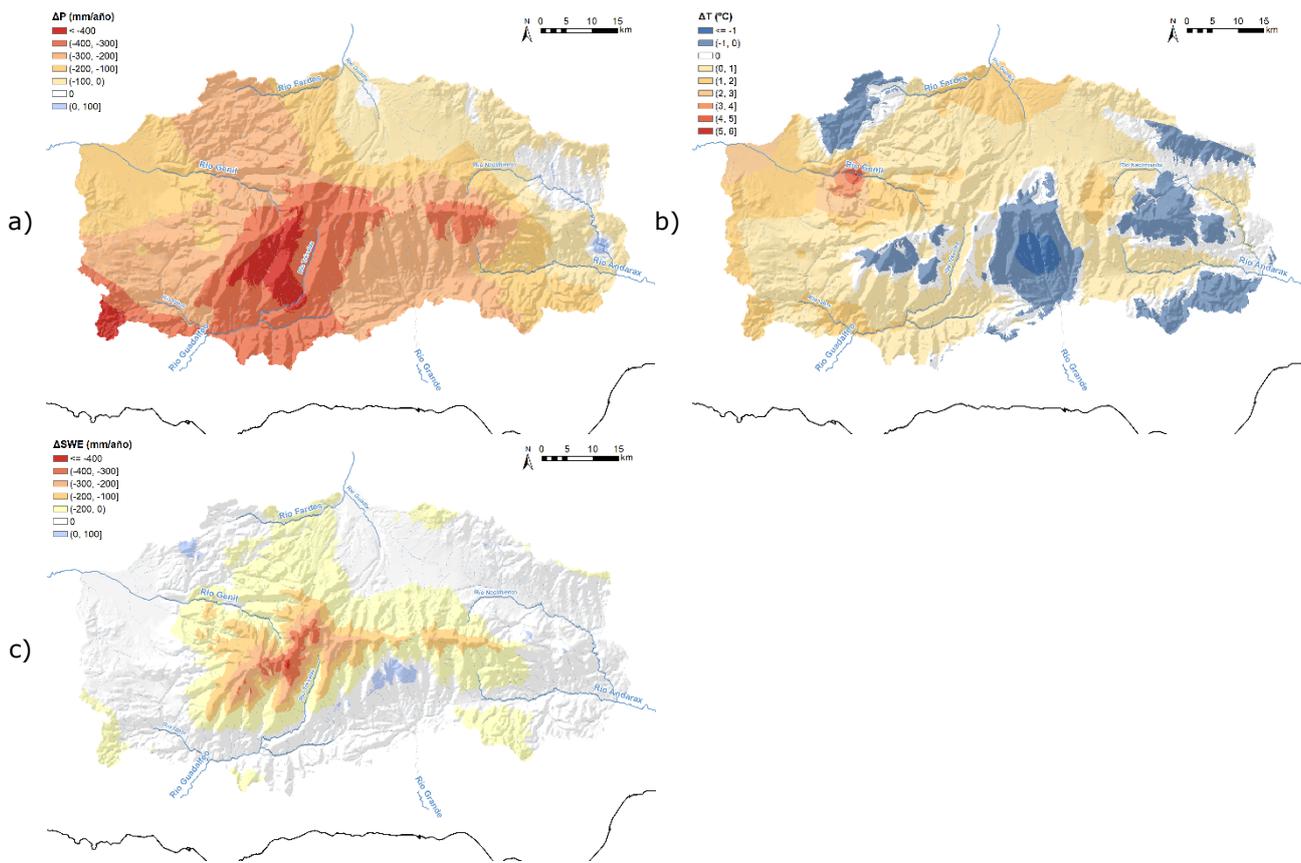


Figura 26. Variación en el P.N. de Sierra Nevada de tres variables climáticas entre el clima predicho para el periodo 2045-2065 en el escenario RCP8.5 y el clima actual: a) precipitación anual en forma de lluvia, b) precipitación anual en forma de nieve, c) temperatura media anual.

Caudal

El aplicar el método de los deltas en la generación de las series climáticas del escenario futuro permite la comparación visual de los hidrogramas simulados, puesto que los eventos de precipitación/sequía ocurren simultáneamente. Figura muestra los hidrogramas simulados para el escenario de clima actual y de clima futuro en las estación 1276 (río Cares, Picos de Europa), la estación 3069 (río Manzanares, Sierra de Guadarrama) y la estación 127 (embalse de Rules, Sierra Nevada).

Las tres estaciones muestran un caudal sensiblemente inferior en el clima futuro durante todo el periodo de simulación. Se observa especialmente en dos hechos, la reducción de los picos de inundación y el adelanto de la recesión del caudal tras el pico de inundación. La pérdida de caudal de los ríos es extrema en Sierra Nevada, donde se convierte en un río efímero.

La Tabla 11 cuantifica la pérdida de caudal observada en los hidrogramas. En esta tabla se recoge el sesgo entre la simulación en clima actual y la simulación en el escenario futuro, estando el resultado expresado en porcentaje sobre la aportación del escenario actual. Por tanto, valores negativos suponen pérdidas de aportación y valores positivos ganancias.

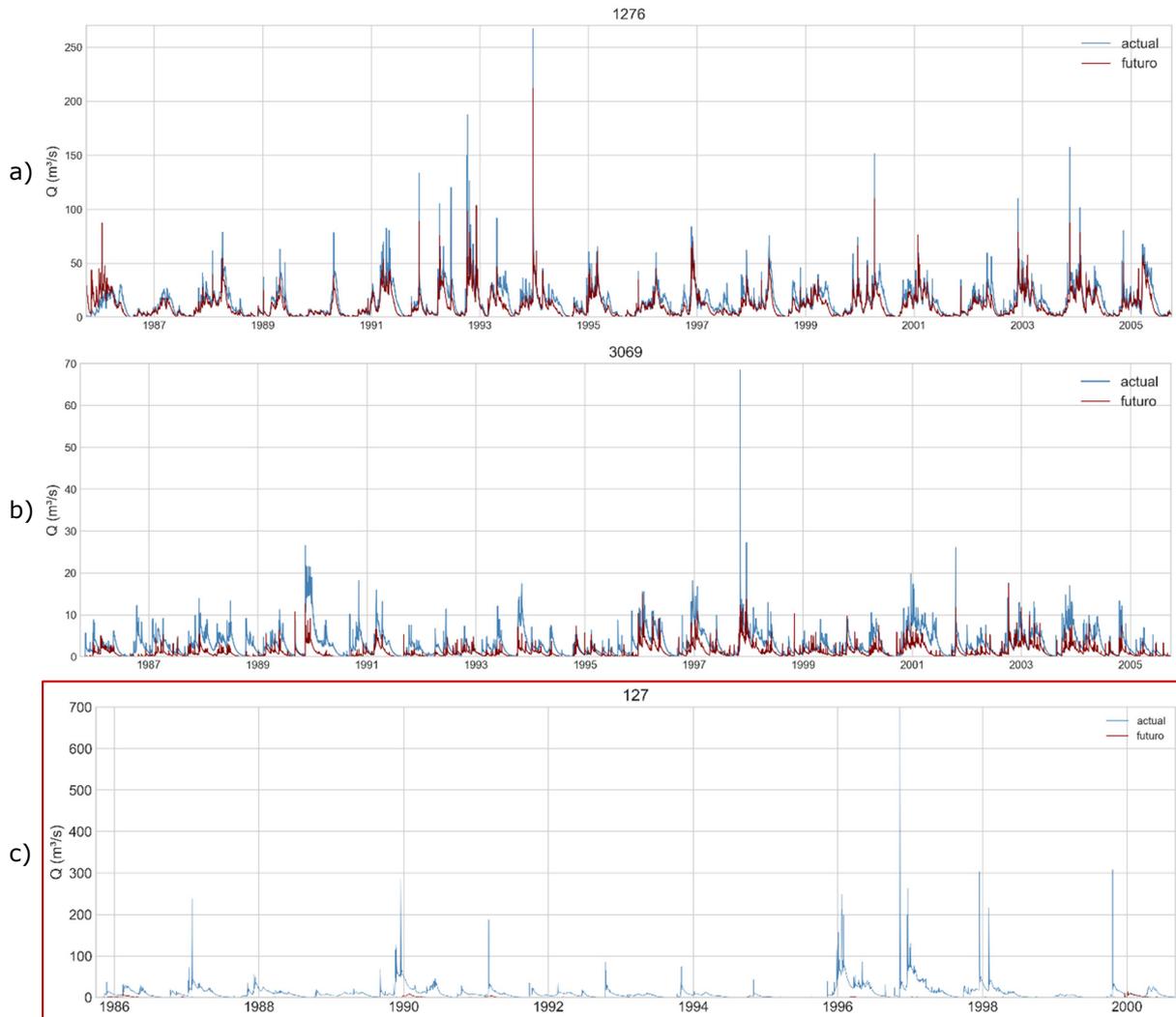


Figura 27. Comparación de los hidrogramas diario simulados para los escenarios de clima actual y clima futuro: a) estación 1276 en el río Cares (Picos de Europa) y b) estación 3069 en el río Manzanares (Sierra de Guadarrama) c) estación 127 en el embalse de Rules (Sierra Nevada).

Ambas estaciones muestran un caudal sensiblemente inferior en el clima futuro durante todo el periodo de simulación. Se observa especialmente en dos hechos, la reducción de los picos de inundación y el adelanto de la recesión del caudal tras el pico de inundación. La diferencia entre los hidrogramas actual y futuro es mucho más marcada en la Sierra de Guadarrama.

La Tabla 11 cuantifica la pérdida de caudal observada en los hidrogramas. En esta tabla se recoge el sesgo entre la simulación en clima actual y la simulación en el escenario futuro, estando el resultado expresado en porcentaje sobre la aportación del escenario actual. Por tanto, valores negativos suponen pérdidas de aportación y valores positivos ganancias.

Picos de Europa	1268 -37.8%	1276 -26.0%	1294 -40.0%	1295 -31.8%					Media -33.1%
Sierra de Guadarrama	2016 -31.5%	2043 -62.9%	2052 -50.6%	2057 -25.8%	3069 -62.0%	3100 -64.6%	3157 -46.4%	3196 -62.0%	Media -50.3%
Sierra Nevada	110 -92,2%	120 -92,2%	123 -88,4%	127 -96,0%					Media 92,2%

Tabla 11. Pérdida de la aportación total en el clima futuro como porcentaje sobre la aportación en clima actual. Se incluyen valores para las estaciones calibradas y la media ponderada en función del área de su cuenca.

Se estiman pérdidas considerables de caudal en todas las estaciones de los tres parques, con valores superiores siempre al 25% de reducción. La situación es extrema en Sierra Nevada, con una reducción media del 92,2%. En los otros dos parques las pérdidas son considerables también, el 50% en la Sierra de Guadarrama y el 33% en Picos de Europa.

Como último comparativo entre el régimen de caudal en el escenario actual frente al escenario futuro, la Figura recoge las curvas de caudales acumulados para ambos escenarios en las estaciones calibradas. La curva de caudales acumulados es una gráfica que aporta la probabilidad de que se exceda un caudal dado en un punto de la red fluvial; es una gráfica de interés pues permite estimar rápidamente los cuantiles, a la vez que se muestra gráficamente el carácter torrencial del régimen de caudal. Un ejemplo de ello es la comparación de las curvas en el escenario actual para las estaciones de Picos de Europa (a) frente a las de Guadarrama (b). Las primeras tienen una curvatura continua y menos pronunciada, lo cual es muestra de un régimen de caudal más estable, es decir, con caudales medios elevados, ausencia de periodos secos y picos menos pronunciados. Las segundas muestran caudales muy bajos para la mayor parte del rango de probabilidad y caudales picos muy marcados, con lo que aparece un quiebro característico en la curva.

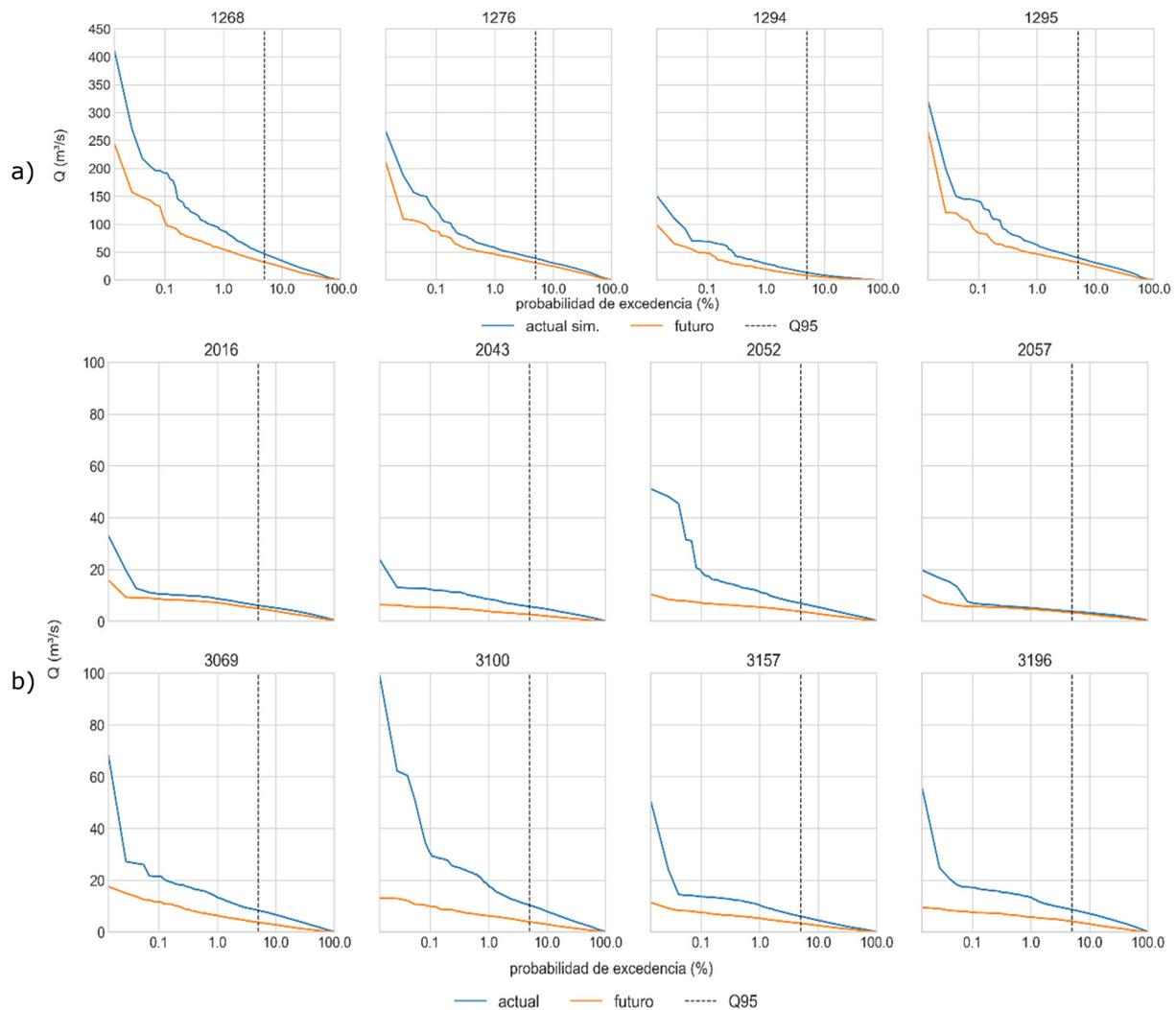


Figura 28. Curvas de caudales acumulados de las estaciones de aforo/embalses calibrados en a) Picos de Europa y b) Sierra de Guadarrama.

Al comparar las curvas para el escenario actual y el futuro, se aprecia de nuevo la reducción del caudal para todo el rango de probabilidad. En Picos de Europa dicha reducción no es tan marcada, mostrada aquí por la cercanía de las curvas, y no cambia el régimen de caudal, con formas de la curva muy similares. Por el contrario, en la Sierra de Guadarrama la reducción del caudal es mucho más drástica, hasta el punto de cambiar el régimen de caudal y desaparecer el quiebro causado por los eventos extremos.

Las gráficas muestran además la línea que marca el percentil del 95% (Q95), es decir, el caudal que se excede con una probabilidad del 5%. Éste, al igual que todo el resto de caudales, es menor en el escenario futuro que en el actual. Esta reducción sólo es notable en algunas estaciones de Guadarrama (2043, 2052, 3069, 3100, 3196), donde es Q95 del escenario futuro es menor a la mitad del Q95 actual.

Componentes del caudal

Conocido el régimen de caudal y la disminución del caudal predicha para el escenario futuro, se analiza ahora el origen de dicho caudal. TETIS permite conocer cómo se genera el caudal circulante por el cauce, es decir, de qué tanque del modelo proviene. De esta forma se pueden generar mapas de escorrentía superficial, interflujo y flujo base, los cuales pueden ayudar a entender el funcionamiento de la cuenca.

Dichos mapas se presentan en la Figura 29. Mapas de la media diaria de los componentes del caudal en Picos de Europa: a) escorrentía superficial, b) interflujo, c) flujo base. La columna izquierda muestra el escenario actual y la columna derecha el cambio predicho en el escenario futuro.

La comparación de los mapas de la columna izquierda de la Figura 29 permite afirmar que el caudal en los cauces de Picos de Europa está eminentemente controlado por el caudal base. Es el principal flujo horizontal (producción media en la cuenca de 49,8 mm/d), seguido del interflujo (0,2 mm/d) y la escorrentía (0,1 mm/d). Se observa que hay amplias zonas en las cotas más altas donde la infiltración es tan alta que no se produce escorrentía ni interflujo.

En el futuro, la escorrentía será menor en gran parte del área de estudio. El hecho de que las zonas rocosas (donde no habrá cambio en la cobertura vegetal) no muestren cambio en la escorrentía, hace pensar que esta reducción del flujo superficial se debe básicamente al cambio en los usos del suelo y no al clima. La explicación sería que el aumento de la cubierta forestal aumentará la evapotranspiración, con lo que el suelo estará menos húmedo y por tanto la infiltración será mayor, limitando la generación de escorrentía. Interflujo y flujo base muestran reducciones en su magnitud en el escenario futuro, siendo más extensas en el segundo caso. Las reducciones en estos dos flujos se deben a las mayores deducciones en capas superiores (ya sea menor precipitación o mayor ETP), puesto que el cambio de vegetación no afecta a ninguno de ellos directamente.

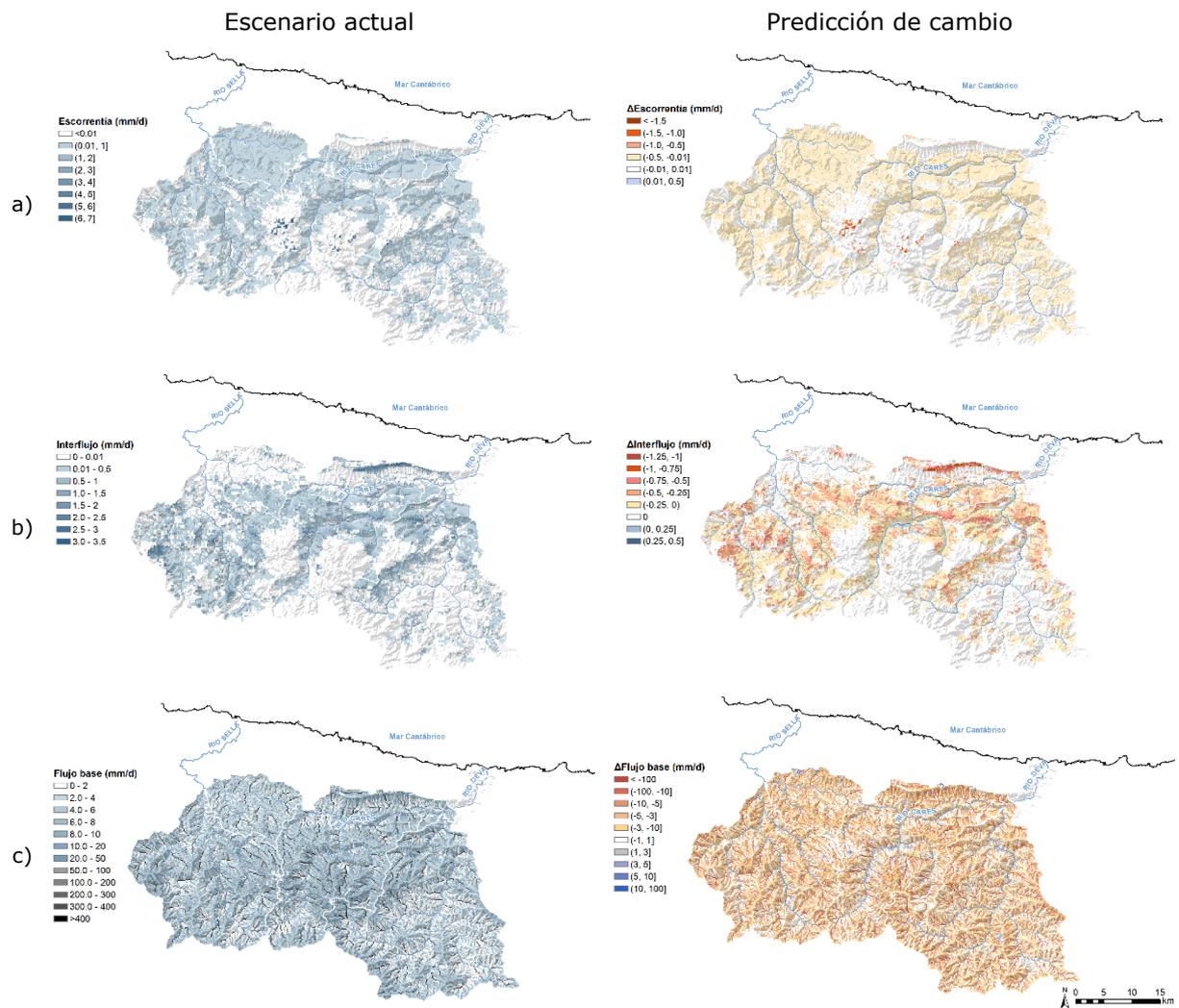


Figura 29. Mapas de la media diaria de los componentes del caudal en Picos de Europa: a) escorrentía superficial, b) interflujo, c) flujo base. La columna izquierda muestra el escenario actual y la columna derecha el cambio predicho en el escenario futuro

Los procesos en la Sierra de Guadarrama son muy distintos a los descritos en Picos de Europa. En estas cuencas el caudal en los cauces está controlado principalmente por el interflujo (producción media en la cuenca de 0,92 mm/d), seguido de la escorrentía (0.05 mm/d); el flujo base es inexistente. La escorrentía aparece preferentemente en cotas bajas y topografía llana, mientras que el interflujo se reparte por toda el área de estudio.

La reducción del caudal en el futuro se debe a una drástica reducción del interflujo en todas las cuencas del parque, especialmente en las cotas más elevadas. Esta reducción se debe a las mayores deducciones en capas superiores (esencialmente la menor precipitación), puesto que el cambio de vegetación no afecta al interflujo directamente. La reducción de la escorrentía es muy localizada y, a diferencia de lo comentado en Picos de Europa, no parece ligada al cambio de la vegetación y el aumento de la evapotranspiración que conlleva, sino a la menor precipitación.

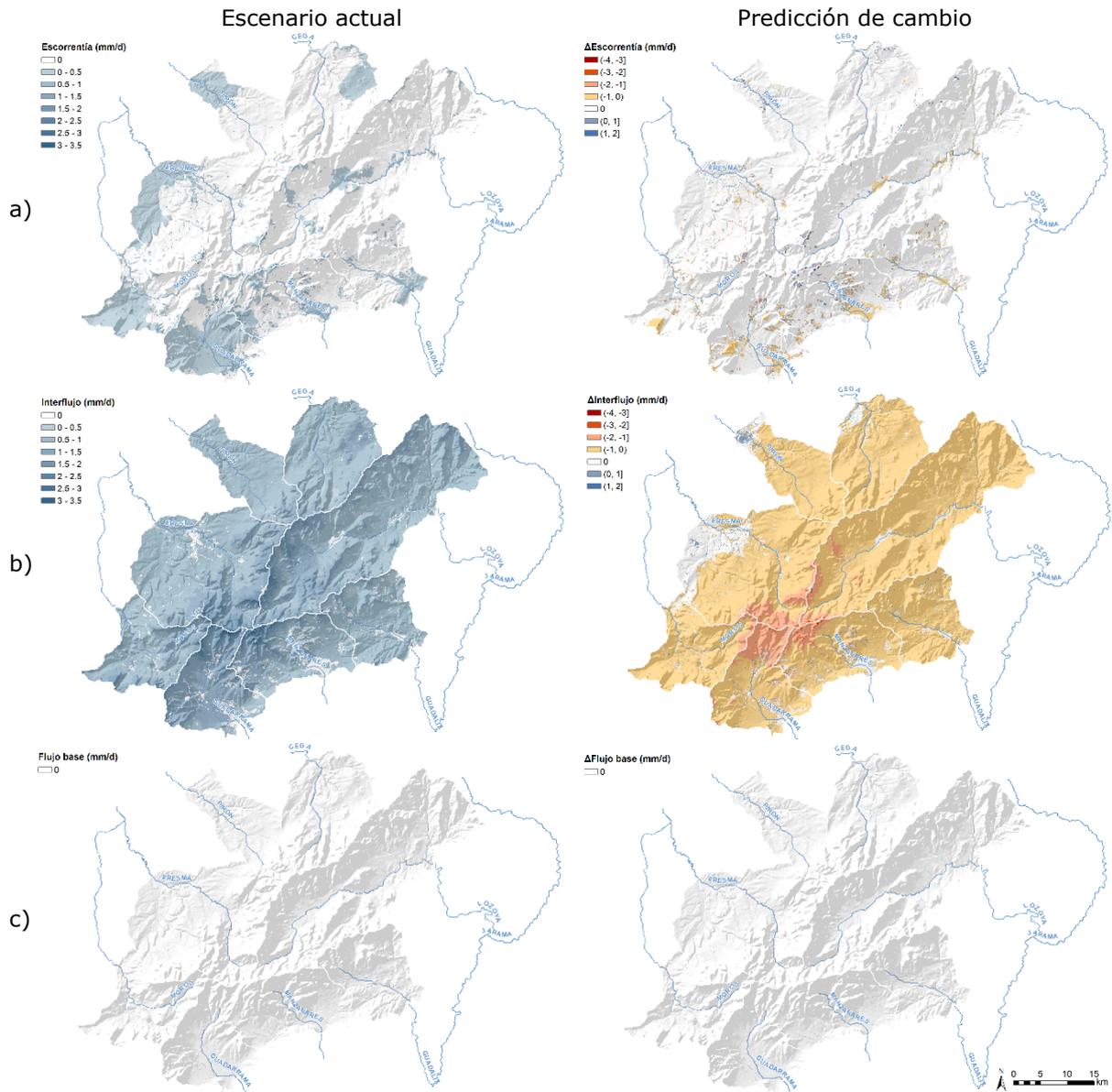


Figura 30. Mapas de la media diaria de los componentes del caudal en la Sierra de Guadarrama: a) escoorrentía superficial, b) interflujo, c) flujo base. La columna izquierda muestra el escenario actual y la columna derecha el cambio predicho en el escenario futuro.

5.4.4. Erosión

Caudal sólido en ríos

Como se comentó en el apartado 5.4.2, el bajo rendimiento del modelo de erosión no permite hacer valoraciones cuantitativas sobre los procesos erosivos, sino sólo comparar cualitativamente la erosión simulada en los dos escenarios simulados.

El modelo del escenario futuro predice un notable descenso del sedimento transportado por los ríos. En la Tabla 12 se muestra la diferencia en el caudal de sedimento entre el escenario futuro y el actual, expresada en porcentaje sobre el caudal de sedimento total en el escenario actual. Se muestran los datos para las dos estaciones para las que se calibró el modelo de erosión.

	estación	río	sesgo (%)
Picos de Europa	120	Deva	-49,6
Sierra de Guadarrama	222	Eresma	-11,2

Tabla 12. Pérdida del caudal sólido en el clima futuro como porcentaje sobre del caudal sólido en clima actual.

Se estima que en ambos parques se reducirá el caudal sólido, siendo esta reducción muy superior en Picos de Europa. Dos factores controlan esta disminución de la erosión y transporte de sedimento: la reducción de la escorrentía superficial y el desarrollo de coberturas de suelo más complejas (p.ej. la expansión del bosque). Anteriormente se mostró que el modelo hidrológico predice una reducción de la escorrentía superficial en ambos parques. Sin embargo, esta reducción no es proporcional a la del caudal sólido; la reducción de la escorrentía en Picos de Europa era muy inferior a Guadarrama (33% frente al 50%) y, en cambio, la reducción del caudal sólido es muy superior en Picos de Europa. Esto sería explicado por el cambio de la vegetación pronosticado en el escenario futuro; mientras que en Picos de Europa el bosque se expandía por amplias zonas, en Guadarrama el cambio en los usos del suelo era muy limitado. El cambio de los usos del suelo parece tener un impacto superior al de la hidrología sobre la producción de sedimentos.

En la Figura 31 se comparan los sedimentogramas diarios en el escenario actual y futuro para las dos estaciones a las que se calibró el modelo de sedimentos.

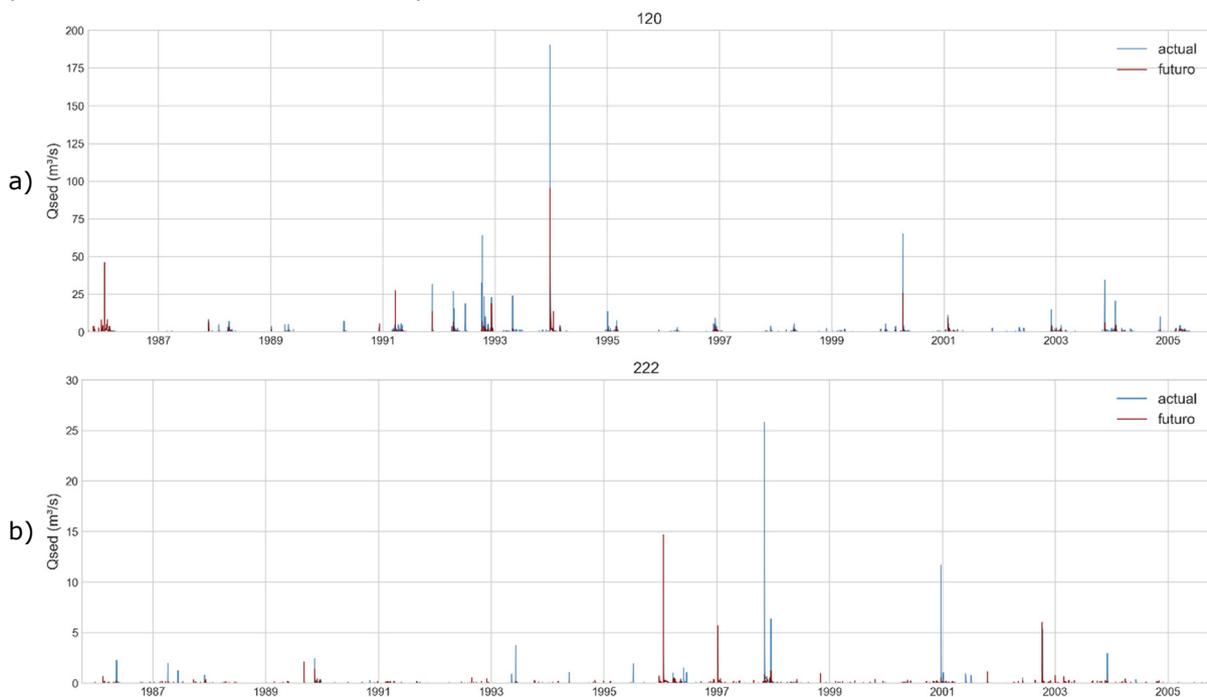


Figura 31. Comparación del sedimentograma diario simulado para los escenarios de clima actual y clima futuro: a) estación 120 en el río Deva (Picos de Europa) y b) estación 222 en el río Eresma (Sierra de Guadarrama).

Erosión en laderas

Si bien el modelo de sedimentos se calibra mediante el sedimento circulante por los cauces, el modelo TETIS simula la erosión en cada celda, permitiendo generar mapas en los que identificar las zonas con erosión susceptibles de actuación. Estos mapas se presentan en la Figura . Se incluye la erosión media anual en el escenario actual y el cambio predicho en la erosión en el escenario futuro.

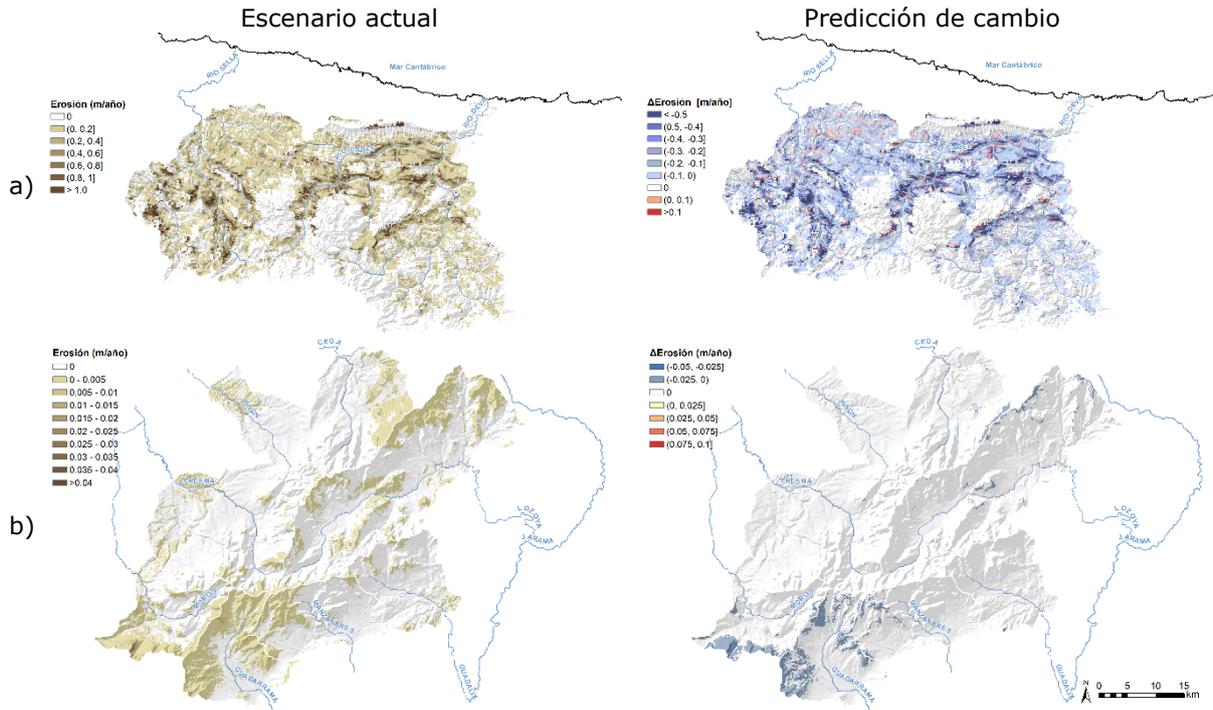


Figura 32. Mapas de la erosión media anual en Picos de Europa (a) y Sierra de Guadarrama (b). La columna izquierda muestra el escenario actual y la columna derecha el cambio predicho en el escenario futuro.

El modelo de escenario actual de Picos de Europa muestra que la erosión se produce en gran parte de la cuenca, a excepción de las zonas más elevadas. En ellas, la alta infiltración impide que haya escorrentía y, por tanto, erosión. Las zonas con más erosión son la cuenca del Cares, parte alta de la cuenca del Sella y la cuenca del Ponga; por el contrario, en el Deva y sus afluentes la erosión es menor. En el escenario futuro se reduce de forma generalizada la erosión, especialmente en el rango medio de altitud del Cares, Sella y Ponga, donde se producía más erosión en el escenario actual. Por el contrario, en las zonas bajas de las cuencas se estima un ligero aumento de la erosión. Esta dinámica estaría directamente ligada con el cambio predicho en los usos del suelo, con la expansión del bosque en cotas medias, limitando la erosión, y el aumento de la superficie agrícola en las zonas bajas, exponiendo el suelo a una mayor erosión.

La erosión en la Sierra de Guadarrama se produce de forma localizada, concentrándose en zonas altas y la cuenca del Guadarrama. En el escenario futuro apenas se observa cambio, produciéndose éste en la zona con mayor erosión actualmente: la divisoria entre la cuenca del Guadarrama y el Moros.

6. LA RED DE INFRAESTRUCTURA VERDE (GIN)

En todos los casos de estudio del proyecto IVERCAM, el mosaico agrosilvopastoral tradicional, generado por un régimen productivo de subsistencia, permaneció prácticamente invariante hasta mediados del siglo XX. A partir de esta fecha, y fundamentalmente durante las últimas décadas, la economía comienza a diversificarse y a centrarse en torno a los núcleos de población más grandes, para el desarrollo de la industria y de los servicios. La baja rentabilidad de los cultivos y el enorme esfuerzo que implicaba su producción y conservación, competía con la atracción de los nuevos polos económicos urbanos. Se trata de un fenómeno constatable a escala europea. La consecuente aceleración de los procesos de abandono de las tierras de cultivo no sólo supuso importantes modificaciones en las economías locales y en el funcionamiento y organización social, sino que implicó profundos cambios en la estructura, dinámica y función de los paisajes, así como en la organización espacial de los usos del suelo. Las tierras de cultivo han quedado relegadas (en el mejor de los casos) a los fondos de valle, de mejor acceso y productividad, mientras que la mayor parte del territorio ha pasado a destinarse al uso forestal. Esta circunstancia ha favorecido la expansión progresiva de matorrales y bosques y la continua homogeneización del paisaje. Por su parte, el aumento de combustible en los montes, la mayor frecuencia de días cálidos y secos durante el verano y las repoblaciones forestales con especies altamente inflamables, han incrementado paralelamente el riesgo de incendio, sobre todo en exposiciones de solana, donde se han detectado tasas de incremento forestal significativamente menores que en laderas de umbría. En función de su frecuencia y severidad, los incendios pueden reemplazar comunidades forestales por otras arbustivas o herbáceas, comenzando de nuevo el ciclo de sucesión. Por otro lado, existen evidencias de que la exclusión total de incendios en zonas habitualmente afectadas por el fuego fomenta la sustitución de comunidades inflamables por otras menos inflamables y de que el aumento de la ocurrencia de incendios conlleva el proceso contrario, alterando en último término la estructura y función de los paisajes naturales.

En este contexto, la regeneración de la vegetación, el abandono e intensificación de prácticas agrícolas y los incendios forestales han sido identificados como los procesos más importantes en el control de la dinámica paisajística de las tres áreas de estudio. No obstante, el balance detectado durante las últimas décadas debido fundamentalmente al cambio de uso del suelo, que ha pasado de una sobreexplotación hasta mediados del siglo pasado a un abandono casi absoluto durante las últimas décadas ha provocado en el área de estudio, así como en la mayor parte de las áreas rurales montañosas del norte de España y muchas otras áreas de Europa y del Planeta (Figura 33) una expansión sin precedentes de las masas forestales. Igualmente, la aproximación multitemporal desarrollada en este proyecto coincide en que la disminución de la presión antrópica sobre los ecosistemas permitirá, de cara al futuro, una regeneración y densificación forestal continua de las zonas abandonadas, incluso en un escenario de pura persistencia (BAU-30), lo que conformará los elementos vertebrales de la Red de Infraestructura Verde multifuncional y estructurada en función de cada paisaje.

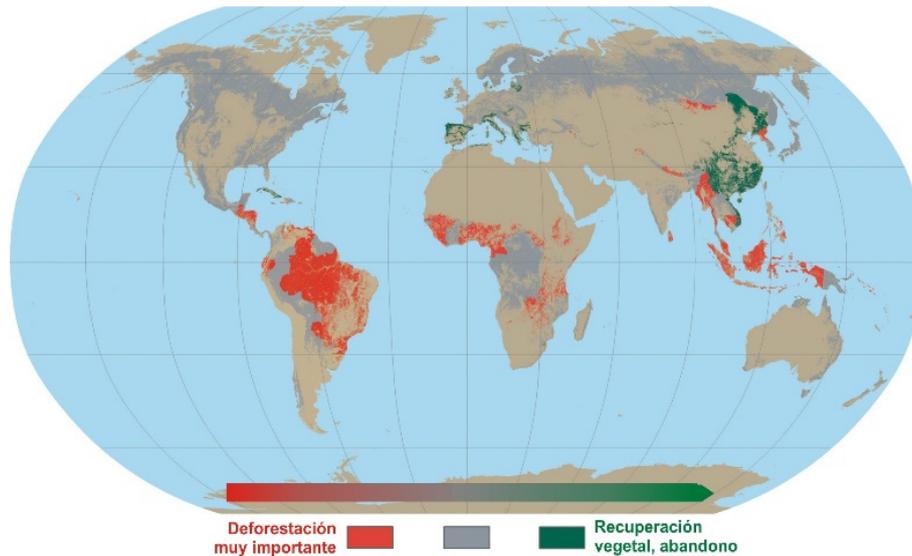


Figura 33. Deforestación y recuperación vegetal en el mundo. Fuente: adaptado de FAO.

El concepto de multifuncionalidad de la Infraestructura Verde no implica únicamente la eliminación o recuperación de la cubierta vegetal, sino una gran variedad de procesos complejos con múltiples interrelaciones, que a su vez determinarán los servicios ecosistémicos proporcionados a las sociedades humanas. Entre ellos se puede mencionar la alteración de las propiedades edáficas, el aumento o disminución de la luz que llega a la superficie, la fertilización temporal del suelo por la infiltración de nutrientes o la alteración de la red de drenaje local. De forma indirecta, las funciones atribuidas a los bosques se verán igualmente afectadas (Figura 34).

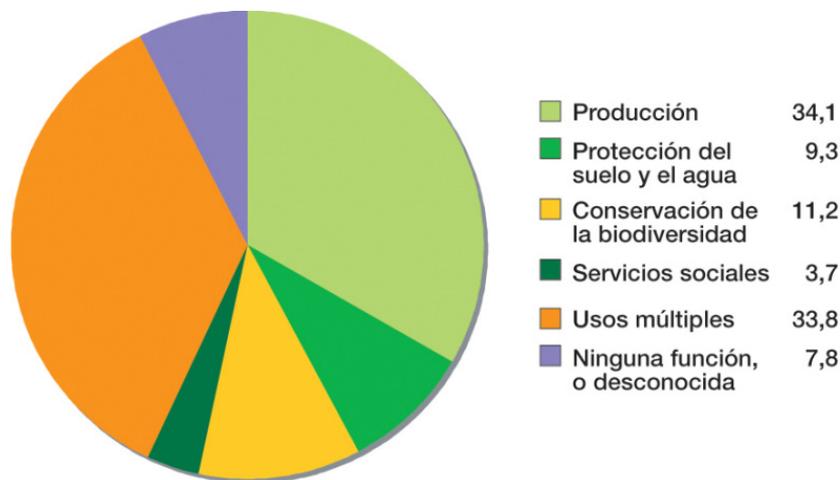


Figura 34. Funciones atribuidas a los bosques en el mundo (año 2010; en %). Fuente: FAO.

Uno de los ámbitos donde la repercusión de estos cambios se manifiesta de manera más destacada es en las cabeceras de los ríos de los sectores de montaña media, propios de los 3 PPNN seleccionados en este estudio. Los ríos de cabeceras deforestadas, sometidas a una intervención antrópica intensa, muestran una calidad del agua significativamente menor que los de cabeceras en buen estado de conservación, con menores valores de pH, mayores temperaturas y menores concentraciones de oxígeno disuelto, así como valores más elevados conductividad y de iones disueltos.

Para evaluar los efectos de los cambios de usos de las tierras sobre los recursos hídricos es esencial comprender cómo éstos condicionan el ciclo del agua. Los resultados obtenidos en este proyecto han permitido determinar que la intensificación en el uso de la tierra y la eliminación de la cubierta forestal mediante roturaciones masivas o incendios forestales recurrentes, aumenta el riesgo de erosión por escorrentía superficial, lo que a su vez reduce la fertilidad del suelo y su capacidad para almacenar agua.

Del mismo modo, variaciones en el componente climático, como el aumento de las temperaturas y disminución de las precipitaciones, sobre todo en forma de nieve, alterarán los ciclos hidrológicos y las propiedades de las masas fluviales, afectando igualmente a la vegetación y producción primaria. En este contexto, es evidente que la estructura, dinámica y función de los paisajes, máxime en ambientes mediterráneos o submediterráneos, no responde únicamente a perturbaciones individuales de origen natural o humano, sino más bien a un complejo entramado en que éstas se combinan con restricciones ambientales y múltiples procesos ecológicos (Mouillot et al. 2002). La topografía, el clima, las propiedades edáficas y las características hidrológicas de los diferentes lugares implican variaciones continuas de la estructura del paisaje (lo que define su dinámica), guiando los movimientos de especies y su perdurabilidad en el tiempo, controlando el equilibrio de los flujos biogeoquímicos y modulando los intercambios de agua y nutrientes (afectando, pues, a la función que éstos cumplen en el continuo territorial).

Para poder captar toda esta complejidad territorial, ha sido necesario el uso conjunto de diversas fuentes de datos (teledetección, fotografías aéreas digitales ortorrectificadas y ortofotos actuales, modelos digitales de elevaciones y sus productos derivados y cartografía temática ambiental georreferenciada del área de estudio), así como de diversas aplicaciones SIG de manejo de esos datos. Su implementación en diversos tipos de modelos mediante las múltiples técnicas descritas, han permitido la identificación de variables críticas para un entendimiento más completo del sistema y los procesos que ocurren en él, a diferentes escalas espacio-temporales.

Por un lado, se han desarrollado modelos exploratorios que han permitido calcular probabilidades de cambio para cada tipo de transición en la ocupación del suelo, estableciendo relaciones con un amplio rango de variables predictivas que han actuado como drivers de un determinado cambio. Por su parte, la dinámica de recuperación vegetal post-perturbación está controlada principalmente por la disponibilidad hídrica y las condiciones edáficas, independientemente del fenómeno que haya producido su eliminación previa y de la escala de estudio considerada. No obstante, existen ciertos matices: mientras la recuperación vegetal post-fuego depende, además, de la altitud y la exposición solar, en la expansión de las masas forestales tras abandono la influencia antrópica juega un papel importante.

Por otro lado, los modelos de transición espacial o modelos de simulación basados en Cadenas de Markov y autómatas celulares han permitido, a partir del conocimiento de la historia del sistema hasta su instante actual, describir en términos de probabilidad su estado futuro. En estos modelos se asume explícitamente que las áreas vecinas influyen en la probabilidad de transición de la celda central, discutiendo críticamente la tradicional función de decaimiento de distancia y cuestionando el supuesto de equilibrio. La modelización futura del uso del suelo evidencia la necesidad de desarrollar políticas de

gestión orientadas al mantenimiento de aquellas comunidades vegetales que favorecen el mantenimiento de funciones y servicios ecosistémicos relacionados con los sistemas fluviales, como la reducción del riesgo de erosión y el laminado de los picos de avenida de cara a proveer de agua de calidad a las poblaciones humanas, entre otros usos. Como conclusión final metodológica, se ha demostrado que el uso conjunto de datos derivados de:

- teledetección,
- fotointerpretación,
- información ambiental georreferenciada y
- observaciones de campo,

incorporados en una herramienta SIG de almacenamiento y manejo de datos, ha permitido la generación de modelos descriptivos y de simulación de forma extraordinariamente eficaz. Gracias a este conjunto de datos, técnicas y herramientas ha sido posible estudiar de forma satisfactoria y a diferentes escalas la estructura, dinámica y función de un paisaje heterogéneo, cambiante y sujeto a la interacción múltiple de factores ambientales y antrópicos.

6.1. Propuesta inicial derivada del modelado

En base a los objetivos planteados, la propuesta inicial de Infraestructura Verde (GIN) ha identificado aquellos elementos de la estructura del paisaje que permitan conservar y restaurar la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos en las 3 zonas de montaña seleccionadas, mitigando, a la vez, los efectos del cambio climático. Estas GIN, como se ha comentado, se han relacionado íntimamente con la persistencia y expansión de las masas forestales en los 3 PPNN de estudio, procesos dominantes de la dinámica de los paisajes de montaña peninsulares. De este modo, los elementos de la GIN incluyen aquellos parches de vegetación que han evolucionado sucesionalmente a sistema forestal en los últimos años (a matorral desde pastizal y a bosque desde matorral) y que, en base a los resultados del modelado de cara al futuro, han seguido las mismas trayectorias de cara al 2050.

La propuesta inicial de Infraestructura Verde implica, por lo tanto, la identificación de zonas forestales arboladas persistentes y aquellas de reciente colonización por masas arboladas durante las últimas décadas. En base a esta información se han elaborado los escenarios de futuro *Business As Usual* descritos anteriormente para el año 2050 (BAU-30), en los que se ha identificado del mismo modo la superficie mantenida como bosque desde el momento actual y la que el modelo identifica como nuevas masas forestales para esa fecha. Las tablas 1 y 2 del Apto 4 muestran la superficie total de ambos parámetros (persistencia del bosque y expansión forestal) en los dos periodos de estudio (pasado al momento actual y de este al año 20150) en los 3 PPNN de estudio, Picos de Europa, Sierra de Guadarrama y Sierra Nevada. Por su parte, las Figuras 35, 36 y 37 muestran la persistencia y cambio de bosque desde el pasado (año 1985) hasta el momento actual (2018) y las Figuras 38, 39 y 40 ambos parámetros desde la actualidad hasta el mapa generado para el escenario BAU-30 años (2050).

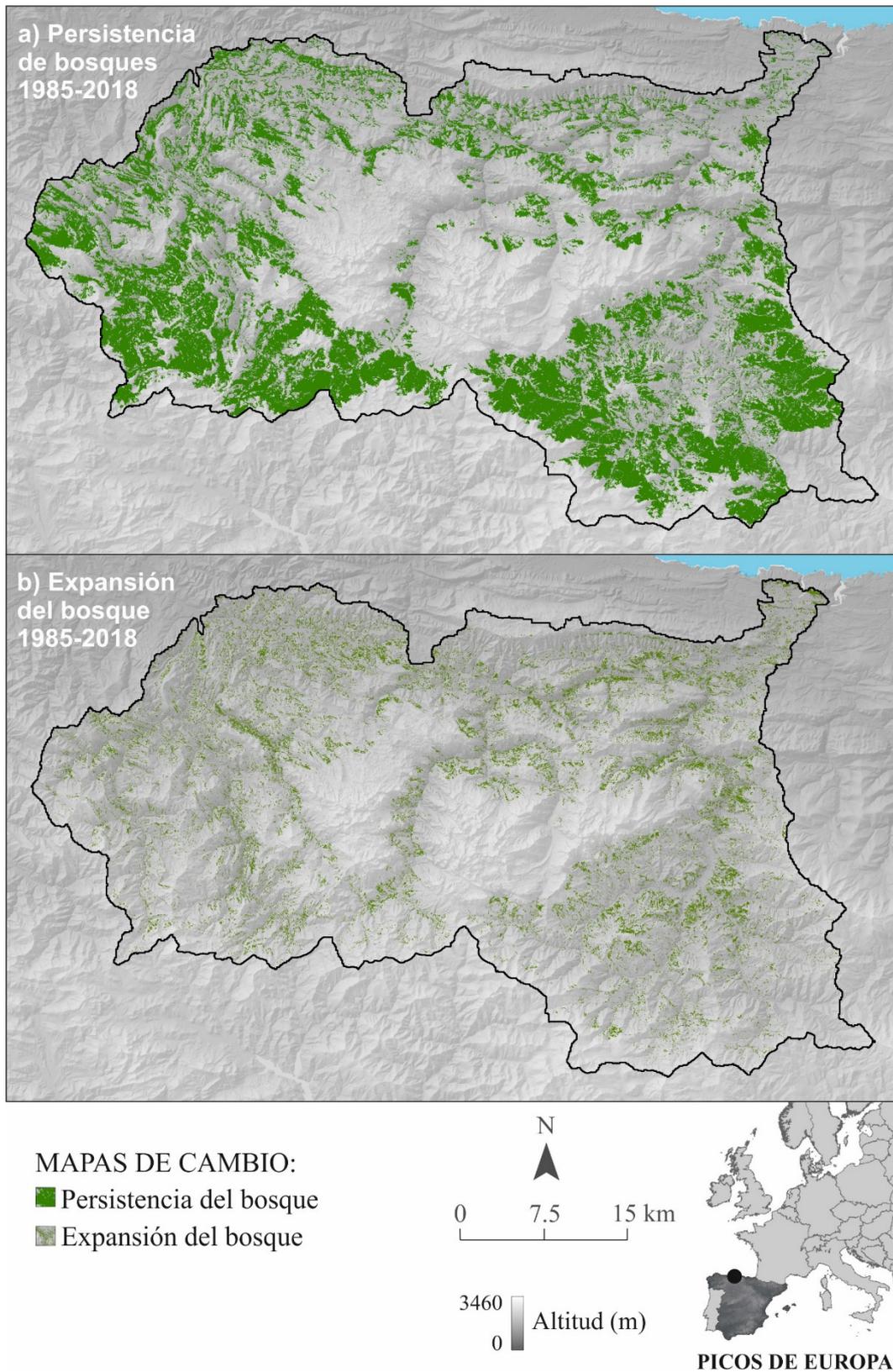


Figura 35. Persistencia del bosque y expansión forestal en el PPNN de Picos de Europa para el periodo 1985-2018.

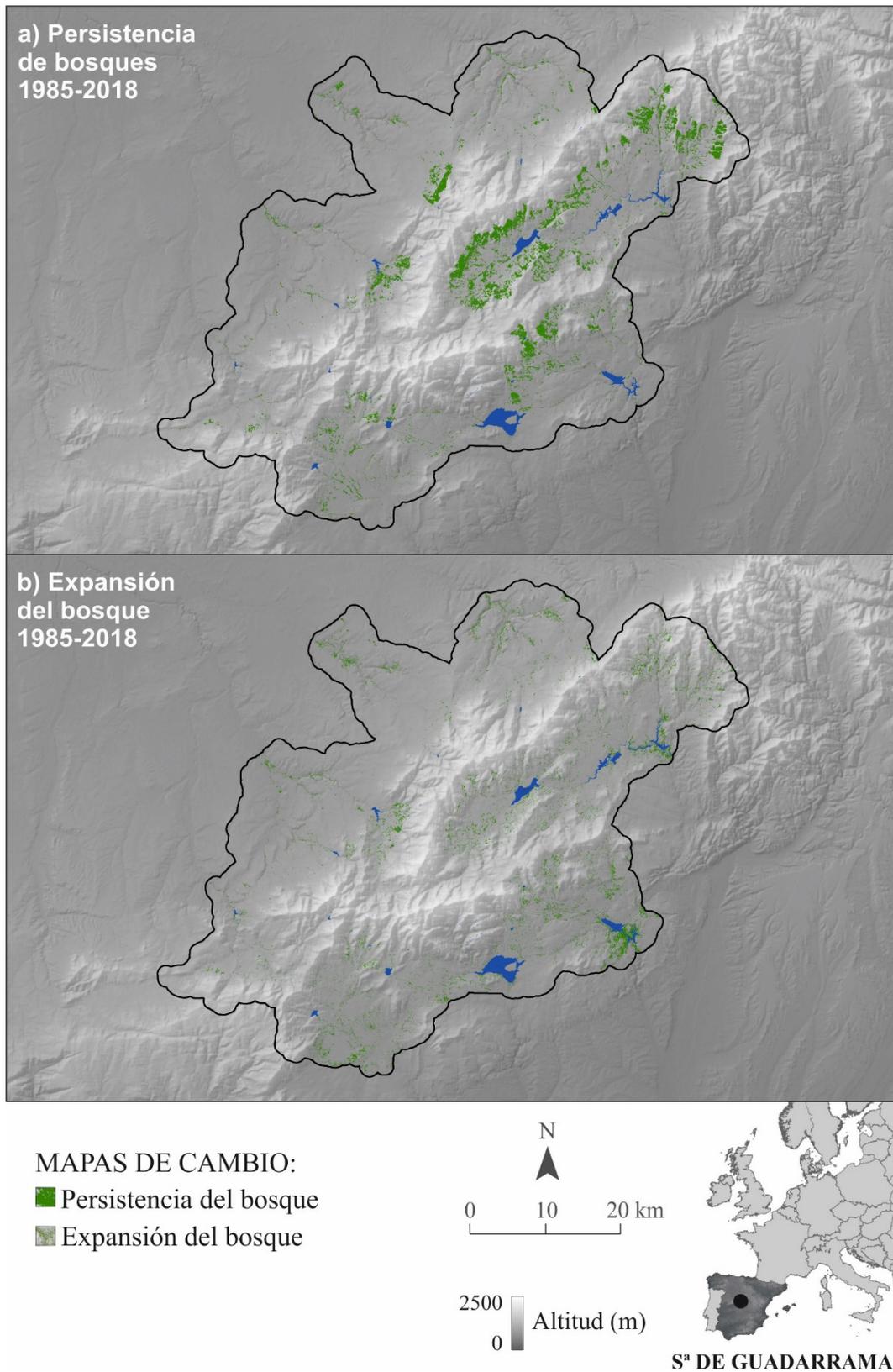


Figura 36. Persistencia del bosque y expansión forestal en el PPNN de la Sierra de Guadarrama para el periodo 1985-2018.

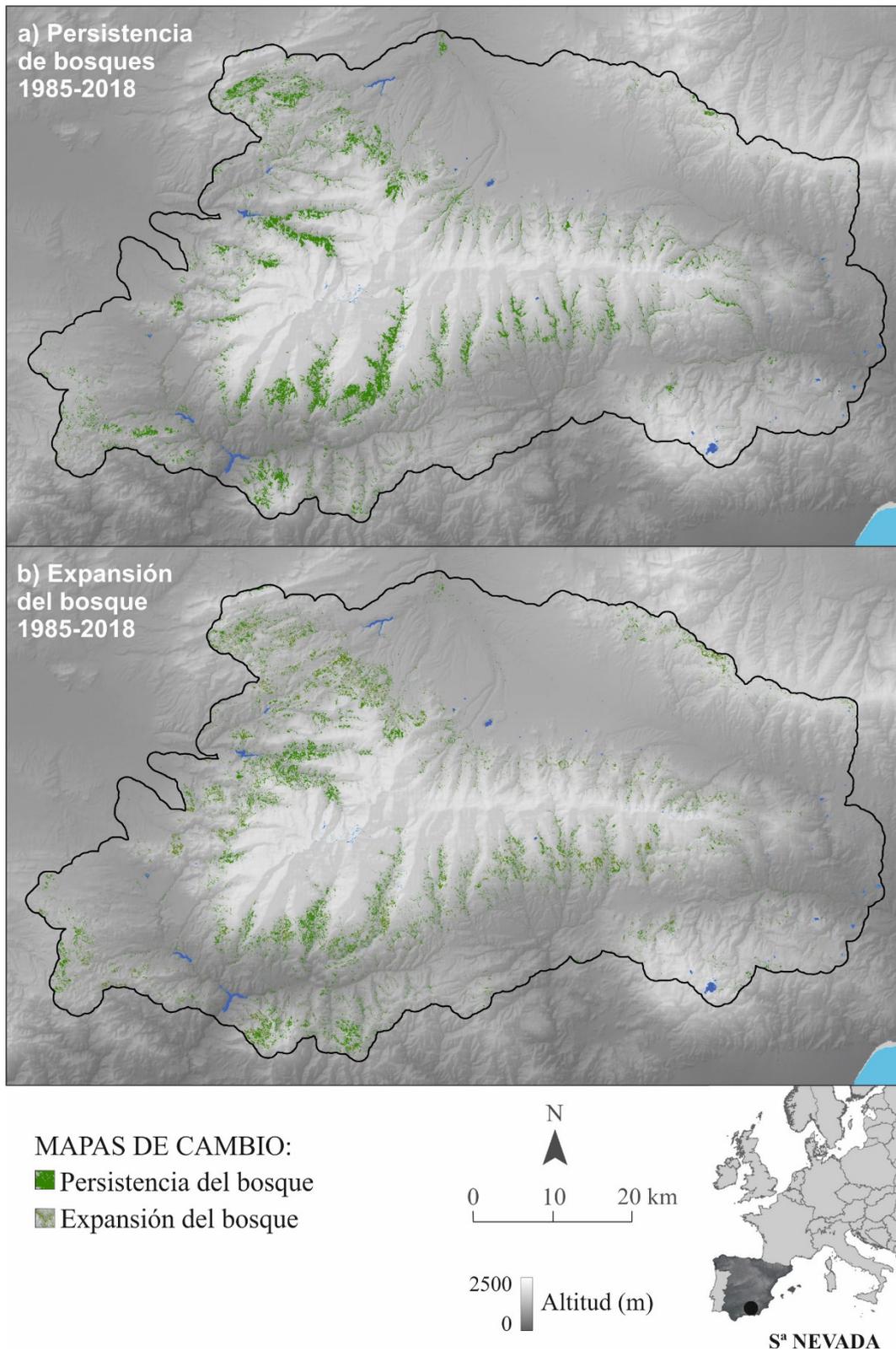


Figura 37. Persistencia del bosque y expansión forestal en el PPNN de Sierra Nevada para el periodo 1985-2018.

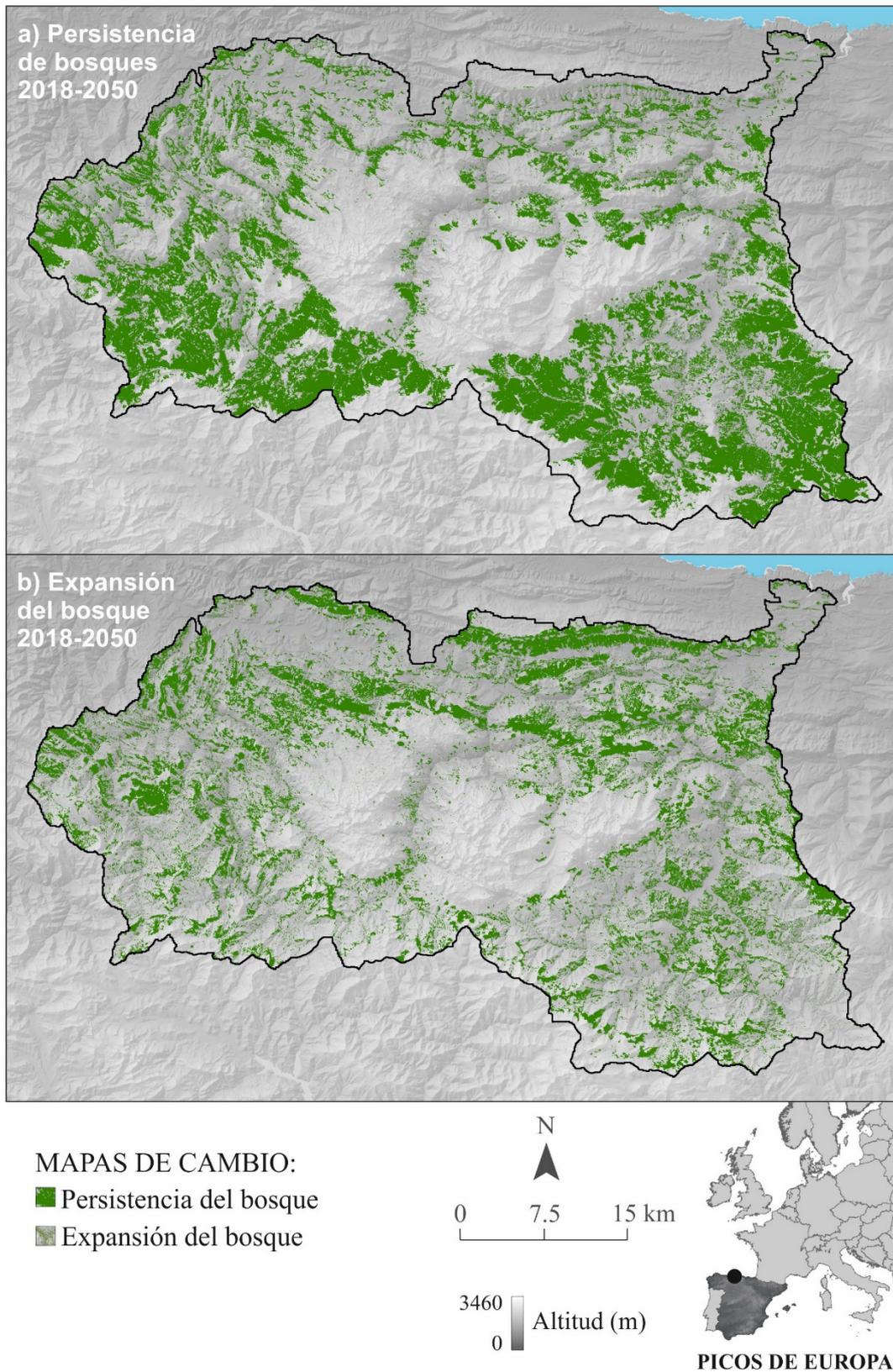


Figura 38. Persistencia del bosque y expansión forestal en el PPNN de Picos de Europa para el periodo 2018-2050.

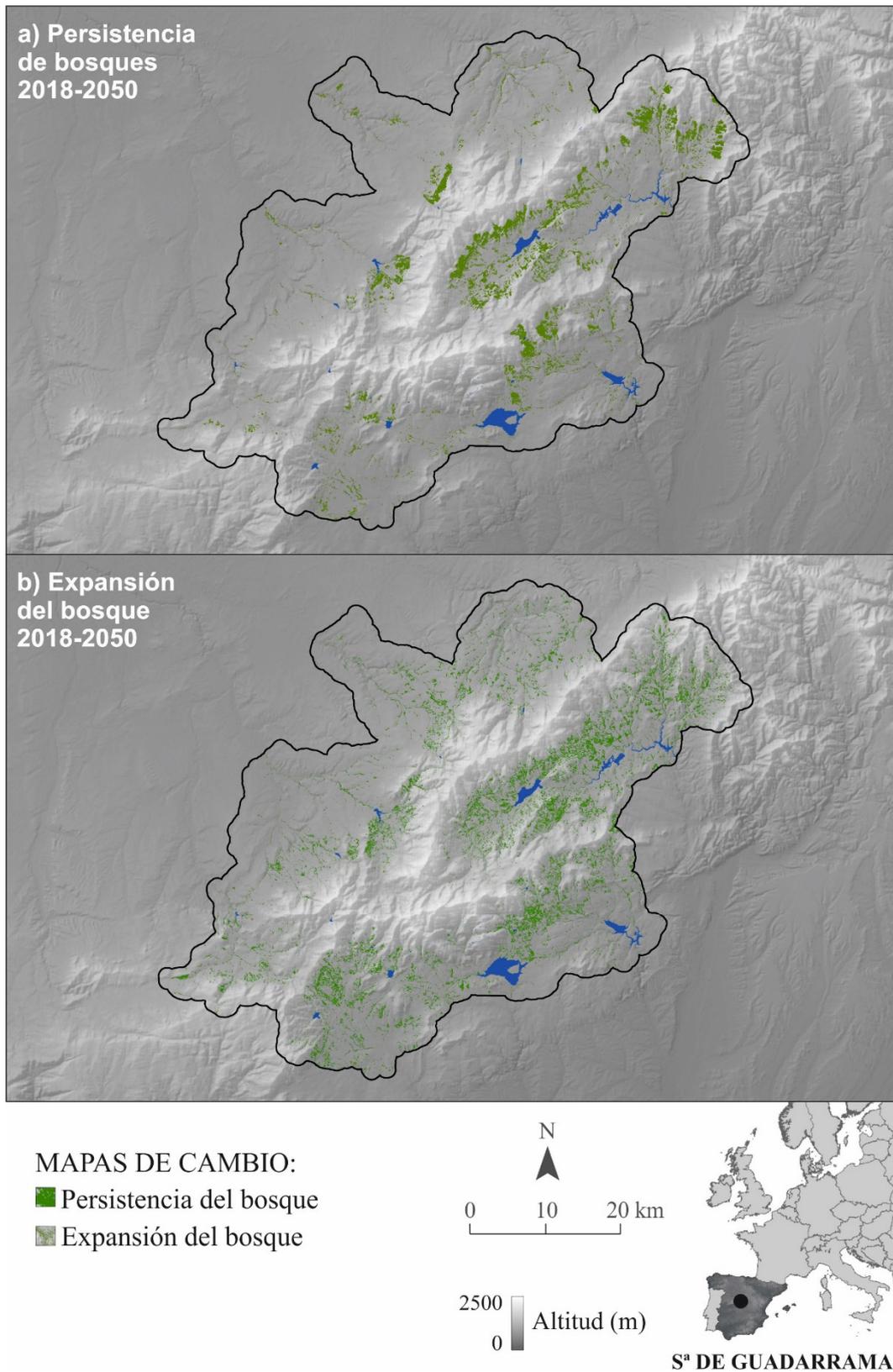


Figura 39. Persistencia del bosque y expansión forestal en el PPNN de la Sierra de Guadarrama para el periodo 2018-2050.

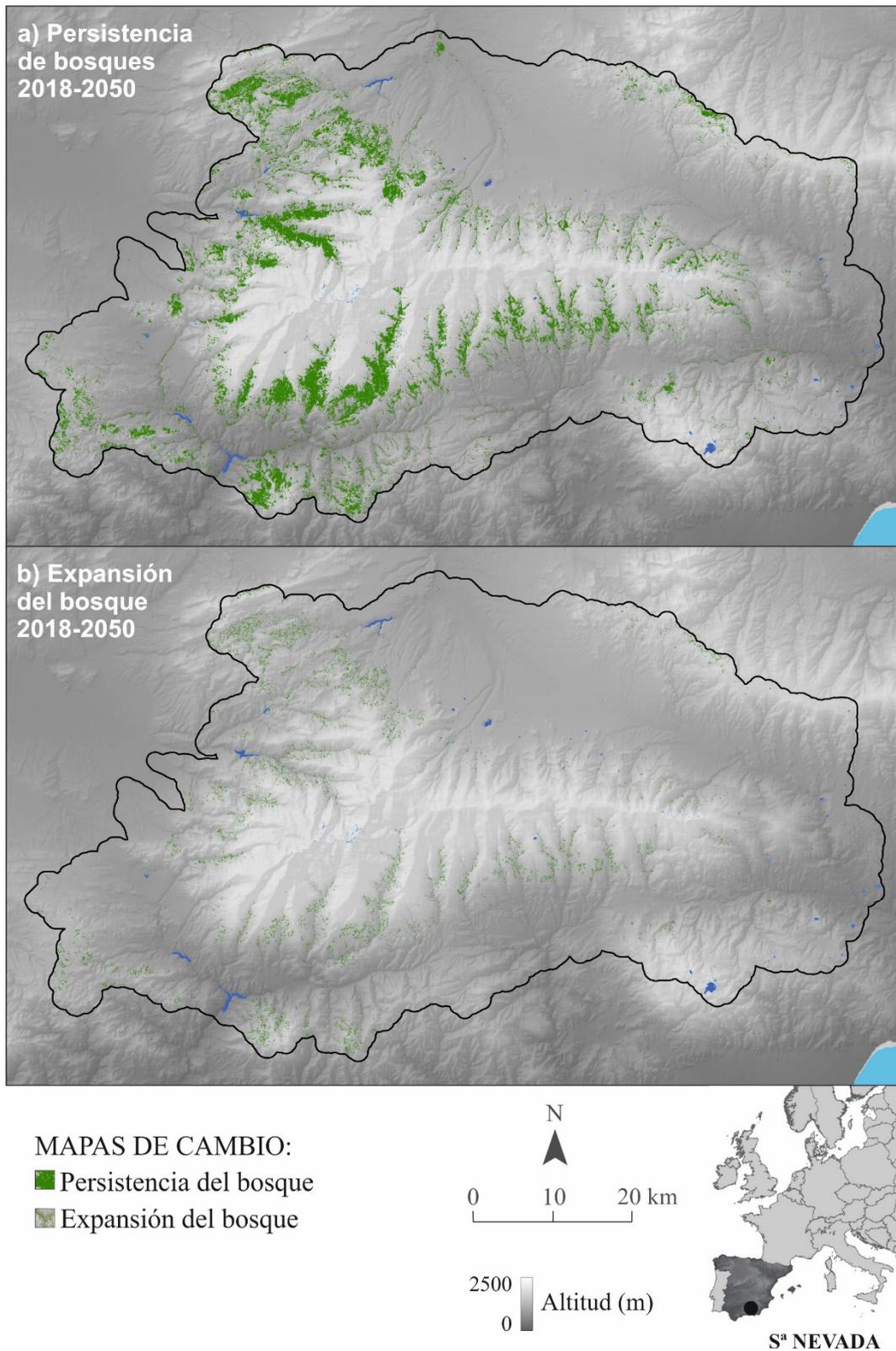


Figura 40. Persistencia del bosque y expansión forestal en el PPNN de Sierra Nevada para el periodo 2018-2050.

6.2. Modelado de servicios ecosistémicos

Una vez comprendida la dinámica del territorio y de cara a demostrar la idoneidad de mantener una estructura del paisaje que favorezca el mantenimiento de las funciones y servicios ecosistémicos ligados a los sistemas fluviales, lo que se encuentra relacionado con la dinámica sucesional de las masas forestales, sobre todo en zonas de montaña, se ha realizado un estudio de una serie de servicios obtenidos clave en zonas de montaña. De este modo, se estimará su provisión en el momento actual y se determinará la necesidad de elementos de Infraestructura Verde en el escenario de paisaje de 2050 (BAU-30 años) como herramienta de adaptación a los cambios producidos en tiempos pasados en detrimento de las funciones ecosistémicas. Dicho de otro modo, ciertos elementos de paisaje existentes en el escenario BAU-30 se añadirán al modelado en el momento actual, tras conocer los servicios ecosistémicos clave a preservar y la opinión de los expertos al resto, para conformar el modelo BAUIV-30 años, es decir, la Red de Infraestructura Verde propuesta en este proyecto para los 3 PPNN de montaña seleccionados.

Los servicios ecosistémicos de abastecimiento, regulación y apoyo (funciones hidrológicas como la regulación de la temperatura del agua, riesgo de inundación, pérdida de suelo, protección frente a incendios, etc.) han sido modelados mediante los modelos hidrológicos TETIS y WinMed, para los PPNN de Picos y Guadarrama, y Sierra Nevada, de forma respectiva, y mediante el uso de la plataforma NetMap para los 3 casos de estudio. El objetivo general ha consistido en analizar la influencia de la red de Infraestructura Verde (GIN) en la mitigación de los efectos del cambio climático en lo referido a la provisión de servicios ecosistémicos para las 3 zonas de montaña seleccionadas.

Como ya se ha explicado, tras analizar los resultados obtenidos en los análisis de cambios en el paisaje y modelado hidrológico, se puede concluir que el fenómeno de rewilding o avance sucesional debido al abandono paulatino de la mayor parte de las zonas de montaña ha permitido una recolonización natural de antiguos pastizales en matorrales y estos en bosques en diferente estado desarrollo. Por ello, y debido a la capacidad de los modelos de ocupación del suelo de detectar estos cambios en los 3 PPNN, se ha conformado una primera propuesta de GINs resultante de cartografiar el avance de formaciones forestales en las últimas décadas (Figuras 38 a la 40 del apartado anterior). Parte de esta reforestación se corresponde con formaciones de coníferas de fines productivistas, y parte ocurre en lugares que, en un escenario de mejora de servicios hidrológicos, no responde a la idea de red de función activa sobre los mismos.

De este modo, tras la definición empírica de una red formada por elementos del paisaje, se contó en una segunda fase con criterio de experto para definir, entre todas las zonas potenciales, aquellas más acorde con los objetivos planteados en el proyecto. No obstante, algunos servicios específicos (zonas de vega sensibles al laminado de picos de inundación, la erosión en ciertos puntos de las cuencas vertientes a la red fluvial o riberas que maximicen la proyección de sombra a los cauces, de cara a mejorar la calidad del agua de abastecimiento humano, entre otros muchos usos), han requerido de análisis específicos desarrollados con la herramienta NetMap. Los resultados obtenidos permiten identificar las zonas afectadas positivamente por el desarrollo de los elementos de la red de Infraestructura Verde y proponer medidas que mejoren el servicio ecosistémico considerado con las herramientas "verdes" disponibles de manejo de ecosistemas.

De este modo, en IVERCAM se han modelado los siguientes servicios ecosistémicos con el objeto de definir los elementos finales que constituirán la red de cada PPNN:

1) Defensa frente a la erosión del suelo. El resultado del modelado nos indica aquellas zonas de producción y transferencia potencial de sedimentos a los cauces que deben ser restauradas. El modelo permite definir de forma espacial la entrada y efecto acumulativo de los sedimentos a la red fluvial por el efecto de arrastre del suelo por escorrentía.

Solución aportada por la Red de Infraestructura Verde: definición de zonas a restaurar. Es importante remarcar el concepto de "potencial" del modelado de la erosión. La ecuación utilizada se basa en criterios geomorfológicos, sin tener en cuenta la cobertura de vegetación actual o futura. La red propuesta provocará un efecto de retención y protección de la pérdida de sedimento en puntos críticos de la red fluvial de los 3 PPNN.

2) Prevención de picos de inundación en zonas sensibles. Las respuestas lluvia caudal se maximizan en zonas donde la infiltración y retención de la escorrentía es menor.

Solución aportada por la Red de Infraestructura Verde: restauración de llanuras de inundación y vegetación de ribera para laminar la respuesta de incremento de caudal.

3) Disminución de la temperatura del agua. De forma específica se ha modelado la reducción temperatura del agua en puntos clave de la red fluvial, lo que supone un factor clave para las captaciones de agua de abastecimiento humano y el propio funcionamiento del río.

Solución aportada por la Red de Infraestructura Verde: restauración de vegetación de ribera en zonas óptimas para reducción de la temperatura del agua.

Estos tres servicios modelados se ven favorecidos por la continuidad, expansión y redensificación de las masas forestales, si bien otros servicios requieren preservar otras tipologías vegetales en ciertas zonas clave, como pueden ser los sistemas de pastizal en vaguadas para el mantenimiento de pastizales de montaña o zonas clave de alta accesibilidad para mantenimiento de pistas cortafuegos que minimicen la continuidad horizontal de los bosques y reduzcan el riesgo de grandes incendios en los más que probables escenarios de futuro de expansión forestal.

De este modo, se definen dos servicios adicionales:

4) Servicios proporcionados por sistemas de pastizal de montaña. El mantenimiento de sistemas de pastizal aporta numerosos servicios como los relacionados con pasto para ganado, especies de sistemas abiertos, polinizadores, culturales, etc.

Solución aportada por la Red de Infraestructura Verde: aquellos pastizales de amplia superficie y existentes durante las últimas décadas serán excluidos de la Red de Infraestructura Verde basada en expansión forestal de cara a garantizar los servicios múltiples aportados por los sistemas de pastizales de montaña.

5) Reducción del riesgo de incendio forestal. Más bosques, más biomasa en el monte.

Solución aportada por la Red de Infraestructura Verde: reducción de la continuidad de las masas forestales y la biomasa (combustible) acumulada en zonas accesibles y cercanas a poblaciones o zonas de alto valor natural.

De este modo, el modelado de servicios ecosistémicos ha permitido definir de forma espacialmente explícita la distribución de las funciones y servicios descritos mediante NetMap, los modelos hidrológicos y análisis SIG sobre la información raster derivada.

6.3. Consultas a expertos y validación del modelado de servicios

Como consecuencia de la selección de los elementos que conformen la red de Infraestructura Verde, y en un futuro en el que esta se haga manifiesta, se espera una diferencia entre el servicio ecosistémico evaluado en la situación actual y su valor en un escenario futuro de cambio climático en el que se ha implementado la infraestructura. Para la evaluación de la eficiencia o adecuación de la red en base a los resultados esperados, se han realizado tres reuniones con expertos, gestores e investigadores de cada uno de los 3 PPNN, relacionadas con la cartografía disponible de los cambios en el paisaje y las zonas de mayor afección, o más significativas, en relación a los servicios ecosistémicos presentados en el apartado anterior. En total se ha contado con más de 30 participantes, a los que se han mostrado los principales resultados obtenidos tras el análisis de los modelos de cambios en el paisaje (Apartado 4) y modelado hidrológico (Apartado 5) para el pasado, presente y escenario BAU a 30 años, así como los resultados del modelado de servicios ecosistémicos (Apartado 6), con el objetivo de buscar un consenso de red de infraestructura verde derivada de esta comparativa y de la disponibilidad de elementos estructurantes del paisaje.

Las reuniones se han desarrollado en los propios PPNN (una por cada PPNN, en Oviedo, Madrid y Granada) durante una jornada de mañana y otra de tarde. En ellas se han presentado los elementos disponibles para conformar la red de infraestructura verde, incluyendo los elementos del paisaje y sus cambios temporales y la selección de servicios ecosistémicos, con los que se ha mantenido una discusión constructiva, con ideas y propuestas, entre el criterio de los gestores y el del equipo de trabajo de IVERCAM. Este último ha aportado el conocimiento empírico derivado de los resultados del proyecto, estableciendo una propuesta inicial de red de infraestructura verde (Apartado 6.1). Por su parte, los gestores han incorporado un conocimiento experto del medio que aglutina una visión integral de los distintos ámbitos del medio (ambiental, económico y social) con la línea estratégica de gestión hacia la cual se dirigen las 3 áreas de montaña seleccionadas. Dicho conocimiento ha sido posteriormente transferido a la cartografía de la red, creando una propuesta mejorada en base a criterio de experto al añadir elementos que den respuesta a los servicios ecosistémicos específicos descritos en el Apartado anterior. De este modo, a la selección como Infraestructura Verde de nuevos desarrollos del bosque de ribera, inserción de setos vegetados, creación de humedales, expansión y maduración de masas forestales, todo ellos por efecto del abandono del territorio y sus consecuencias ecológicas, ampliamente explicadas anteriormente, se han unido requerimientos específicos relacionados con la erosión activa de laderas, protección frente a inundaciones de zonas urbanas y periurbanas y captación de agua para abastecimiento que requerirán acciones específicas de restauración (y también conservación) para generar o preservar, respectivamente, estos servicios ecosistémicos clave en zonas de montaña.

Las Figuras 41-52 muestran la distribución espacial de estructuras y funciones de paisaje modeladas y relacionadas con los 5 servicios ecosistémicos descritos anteriormente, para cada uno de los PPNN de estudio. Las zonas críticas para cada uno de estos servicios, derivadas de estos mapas, se añadirán a la propuesta empírica inicial de evolución del paisaje por abandono y expansión forestal conformando una red de Infraestructura Verde que optimizará conservación y restauración de cara a maximizar una serie de servicios específicos. Esta solución ha sido además contrastada con expertos gestores de cada PPNN. Así mismo, se destacan en la tabla 13 las principales aportaciones en cuanto a criterios y directrices generales propuestas por los gestores que deberían seguirse en el diseño de la Infraestructura Verde. Estas serán contempladas en el proceso final de diseño de las redes (Apartado 6.4), junto con los servicios contemplados anteriormente y las tendencias observadas en los patrones de cambio del paisaje.

PPNN	Directrices para el diseño de la infraestructura verde
Picos de Europa	Favorecer la maduración y extensión de masas forestales de frondosa (sucesión secundaria). Conservación de pastos de alto valor ganadero.
Guadarrama	Favorecimiento de la sucesión secundaria en masas de frondosa y matorral. Gestión de las masas de pinares: sustitución progresiva por frondosas, favoreciendo su expansión en aquellas zonas más susceptibles de ser recolonizadas por las mismas (vaguadas, límites de pinares y zonas clareadas). Empleo de frondosas como elementos de prevención de incendios forestales.
Sierra Nevada	Favorecimiento de la sucesión secundaria en masas de frondosa y matorral. Gestión de las masas de pinares: sustitución progresiva por frondosas, favoreciendo su expansión en aquellas zonas más susceptibles de ser recolonizadas por las mismas (vaguadas, límites de pinares y zonas clareadas). Empleo de frondosas como elementos de prevención de incendios forestales.

Tabla 13. Directrices marcadas por gestores e investigadores de los 3 PPNN.

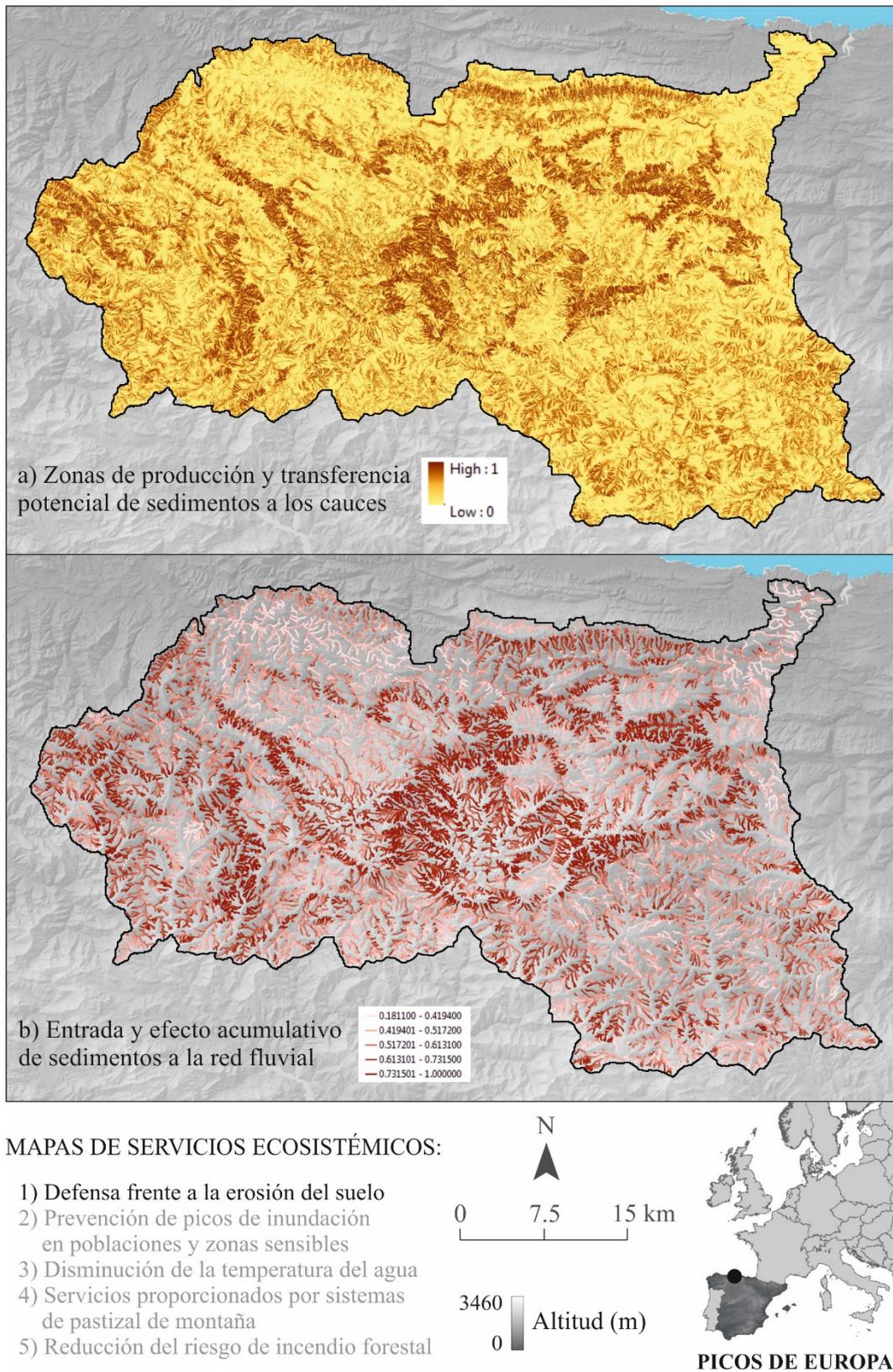


Figura 41. Mapas de ayuda a la toma de decisiones para generación de servicio ecosistémico de defensa frente a la erosión del suelo en el PPNN de Picos de Europa.

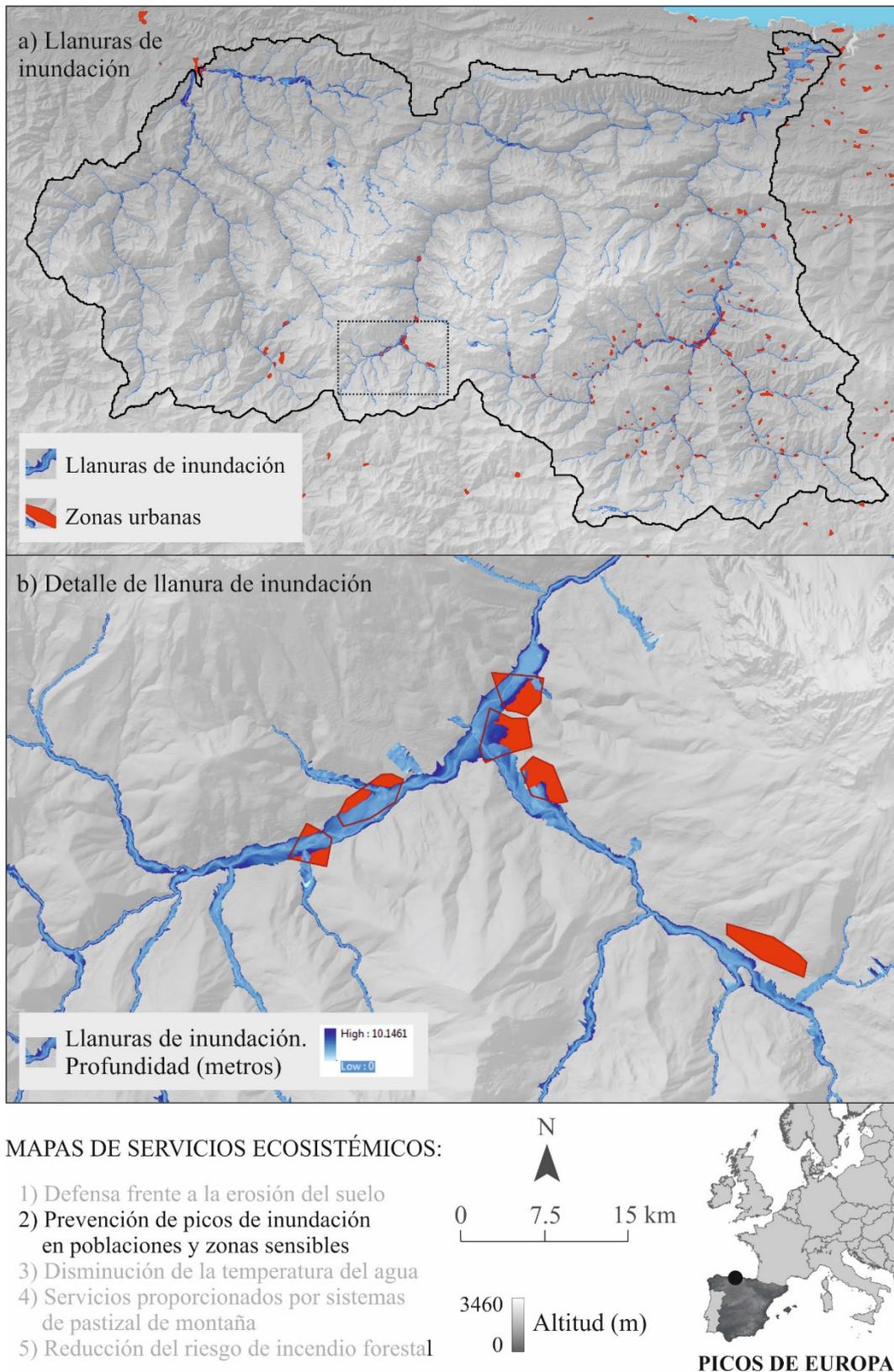


Figura 42. Mapas de ayuda a la toma de decisiones para generación de servicio ecosistémico de prevención de picos de inundación en zonas sensibles en el PPNN de Picos de Europa. a) Panorama general de toda el área de estudio. b) Detalle de zonas urbanas en plena llanura de inundación.

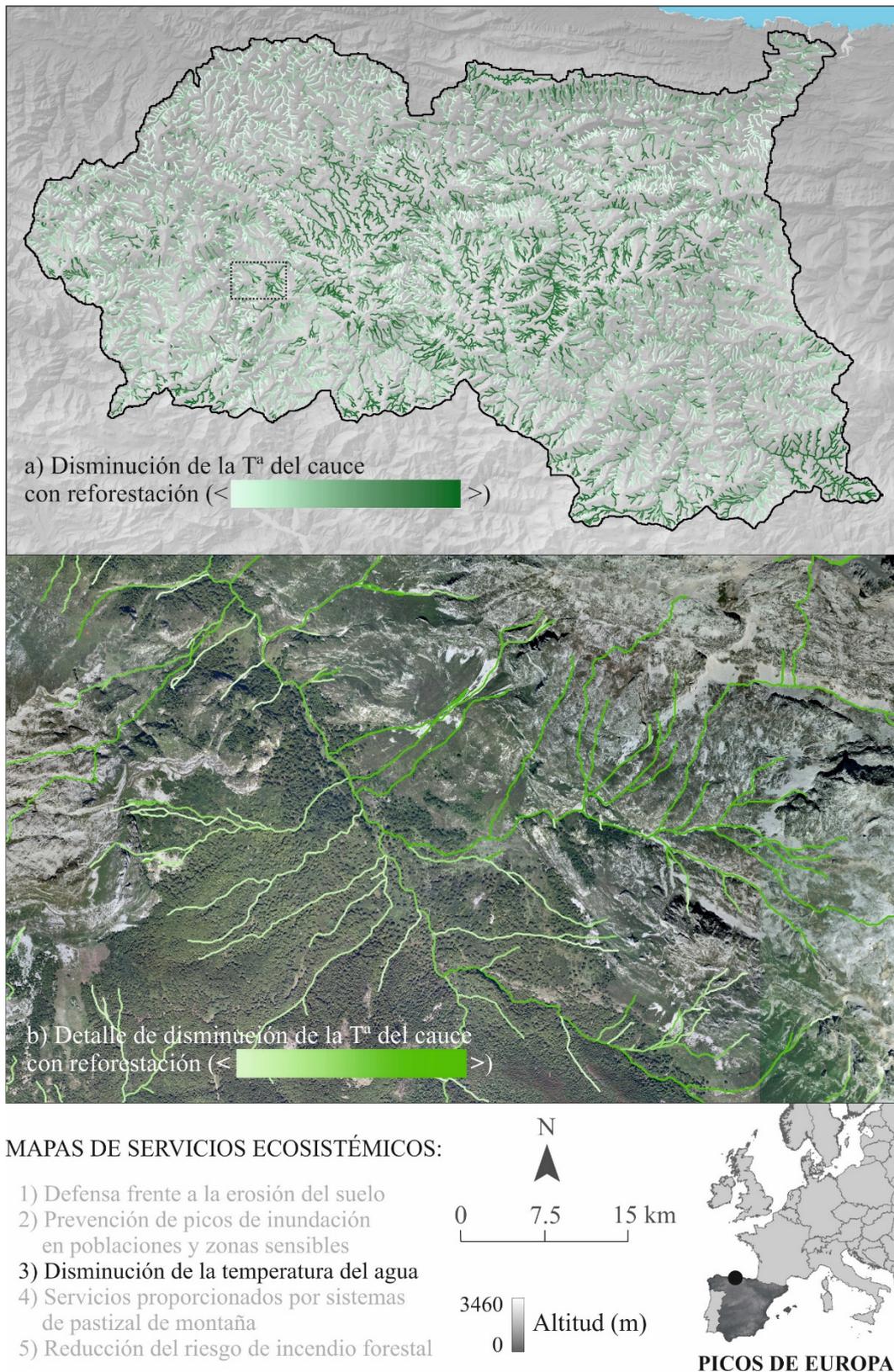


Figura 43. Mapas de ayuda a la toma de decisiones para generación de servicio ecosistémico de disminución de la temperatura del agua en el PPNN de Picos de Europa. a) Panorama general de toda el área de estudio. b) Detalle sobre ortofoto de cauces con diferente potencial de servicio.

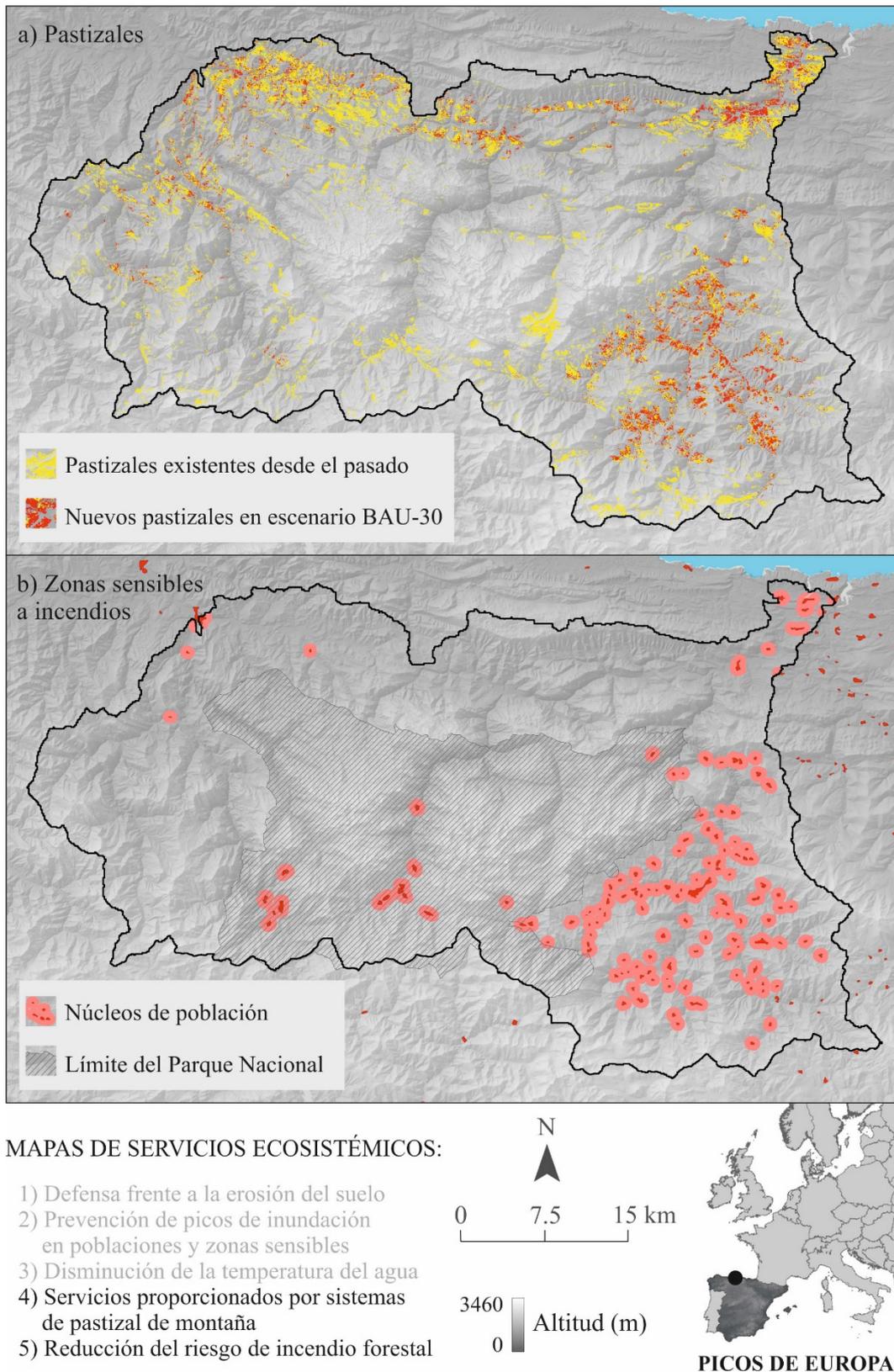


Figura 44. Mapas de ayuda a la toma de decisiones para generación de servicio ecosistémico: a) proporcionado por sistemas de pastizal de montaña (actuales y predichos), y b) reducción del riesgo de incendio forestal en zonas sensibles del PPNN de Picos de Europa.

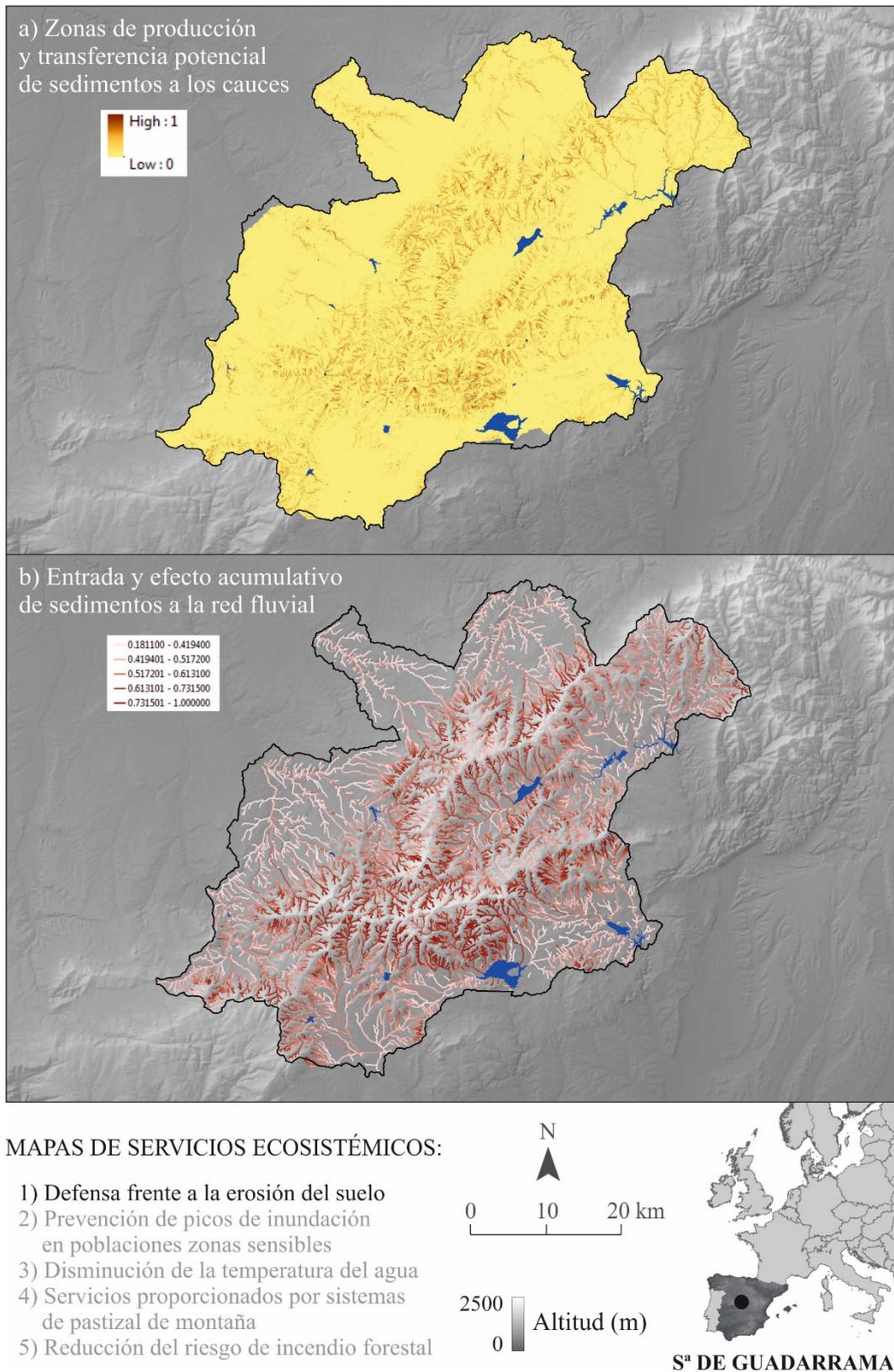


Figura 45. Mapas de ayuda a la toma de decisiones para generación de servicio ecosistémico de defensa frente a la erosión del suelo en el PPNN de Sierra de Guadarrama.

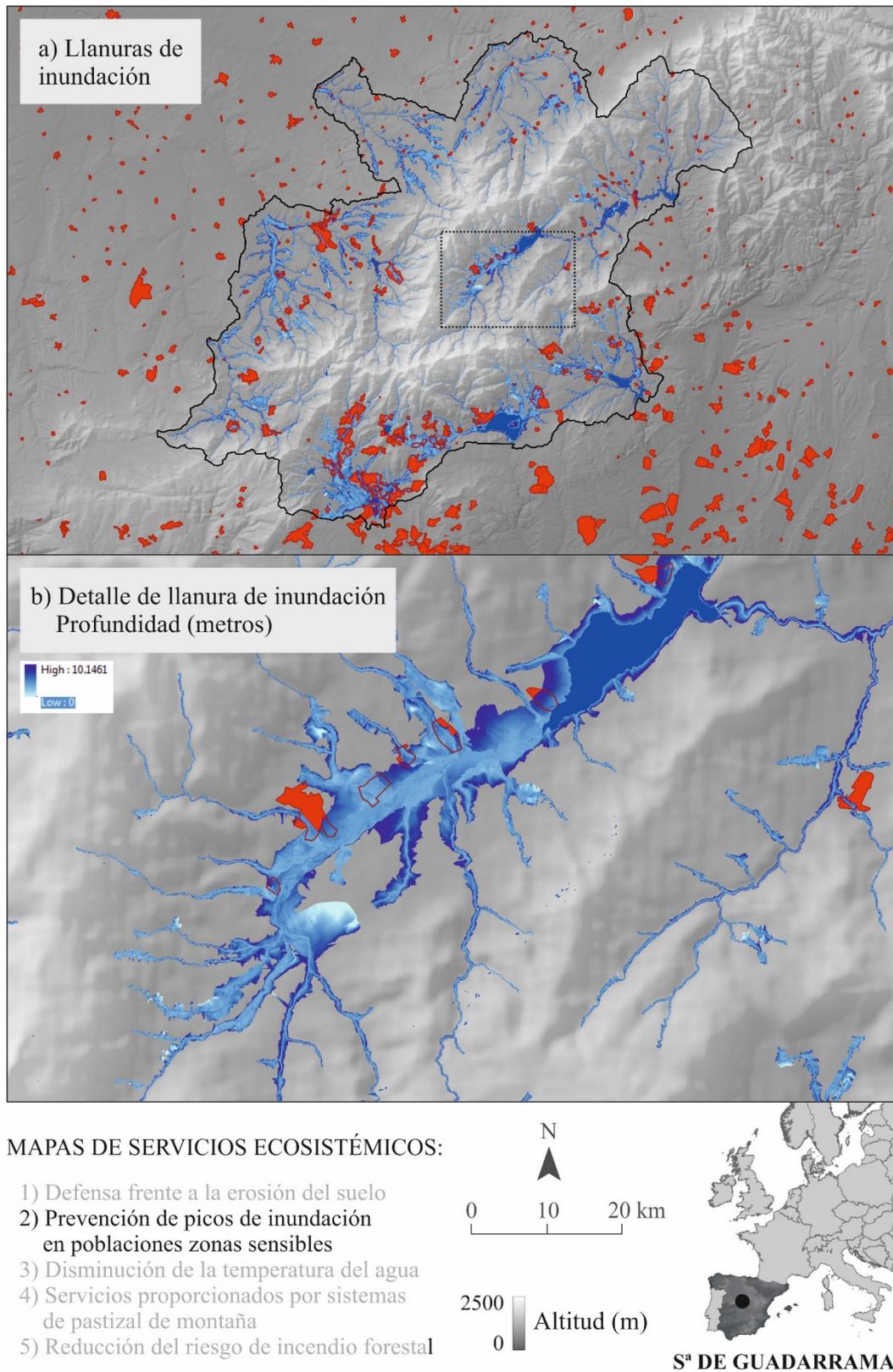


Figura 46. Mapas de ayuda a la toma de decisiones para generación de servicio ecosistémico de prevención de picos de inundación en zonas sensibles en el PPNN de Sierra de Guadarrama. a) Panorama general de toda el área de estudio. b) Detalle de zonas urbanas en plena llanura de inundación.

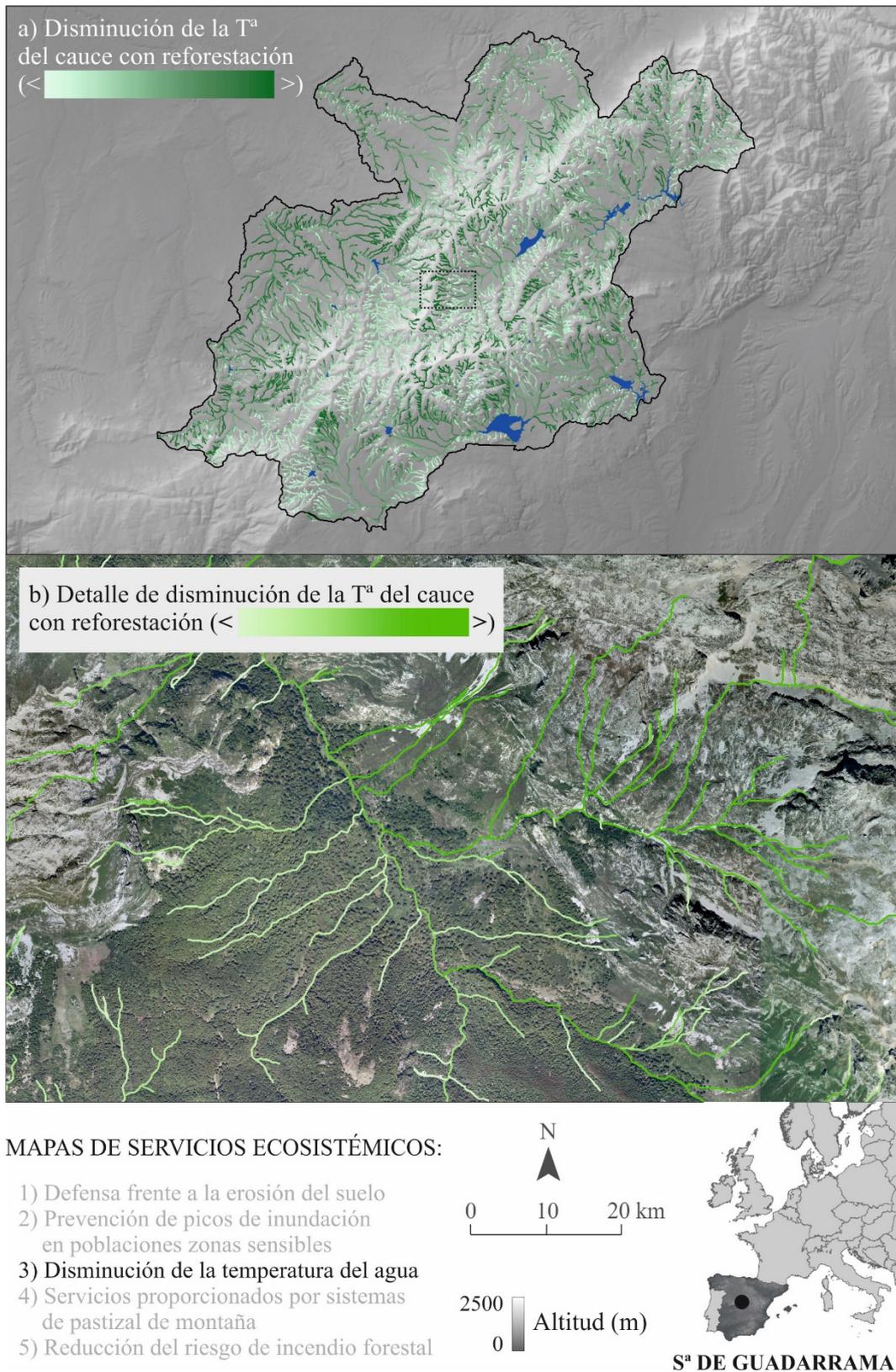


Figura 47. Mapas de ayuda a la toma de decisiones para generación de servicio ecosistémico de disminución de la temperatura del agua en el PPNN de Sierra de Guadarrama. a) Panorama general de toda el área de estudio. b) Detalle sobre ortofoto de cauces con diferente potencial de servicio.

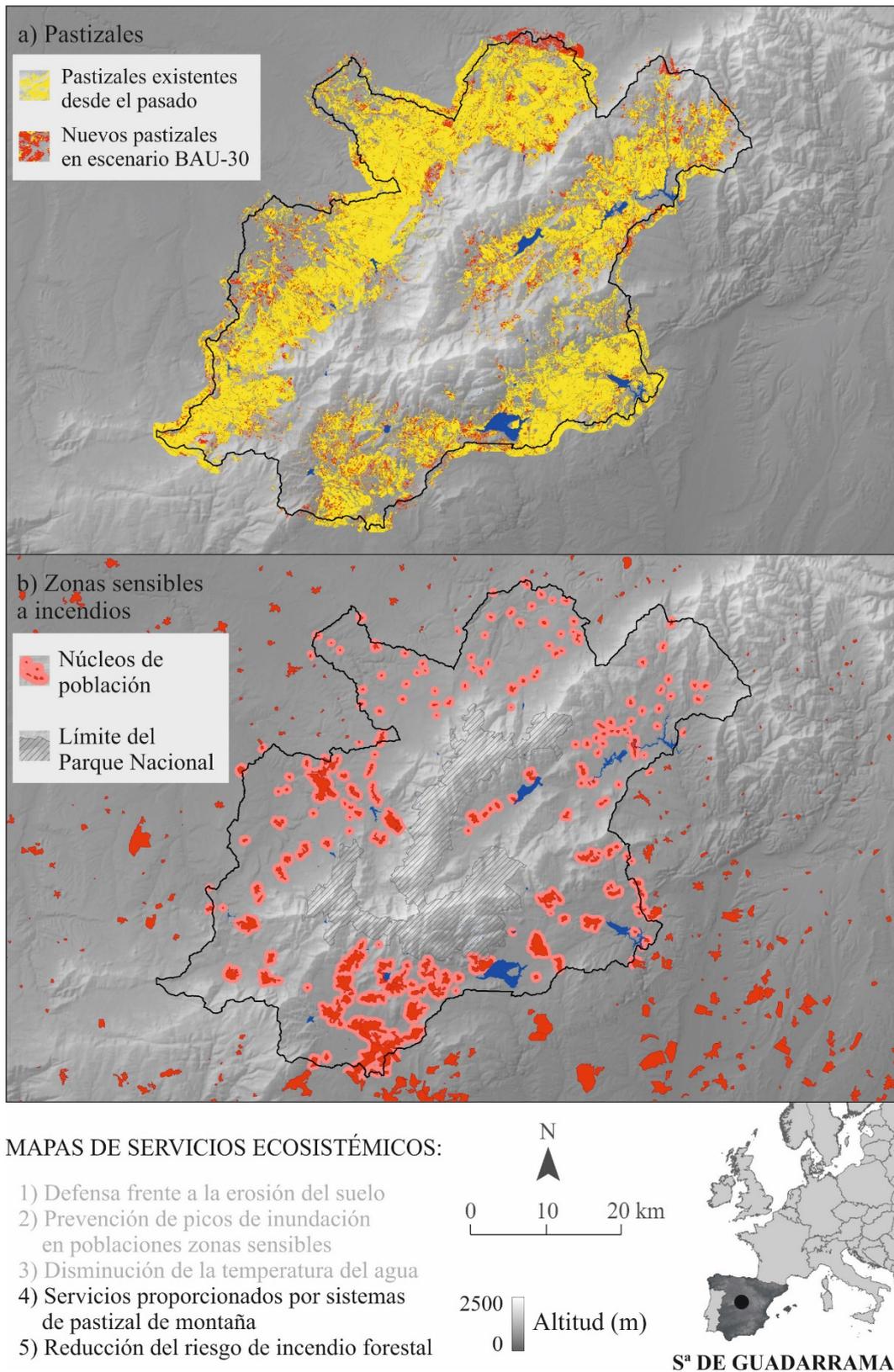


Figura 48. Mapas de ayuda a la toma de decisiones para generación de servicio ecosistémico: a) proporcionado por sistemas de pastizal de montaña (actuales y predichos), y b) reducción del riesgo de incendio forestal en zonas sensibles del PPNN de Sierra de Guadarrama.

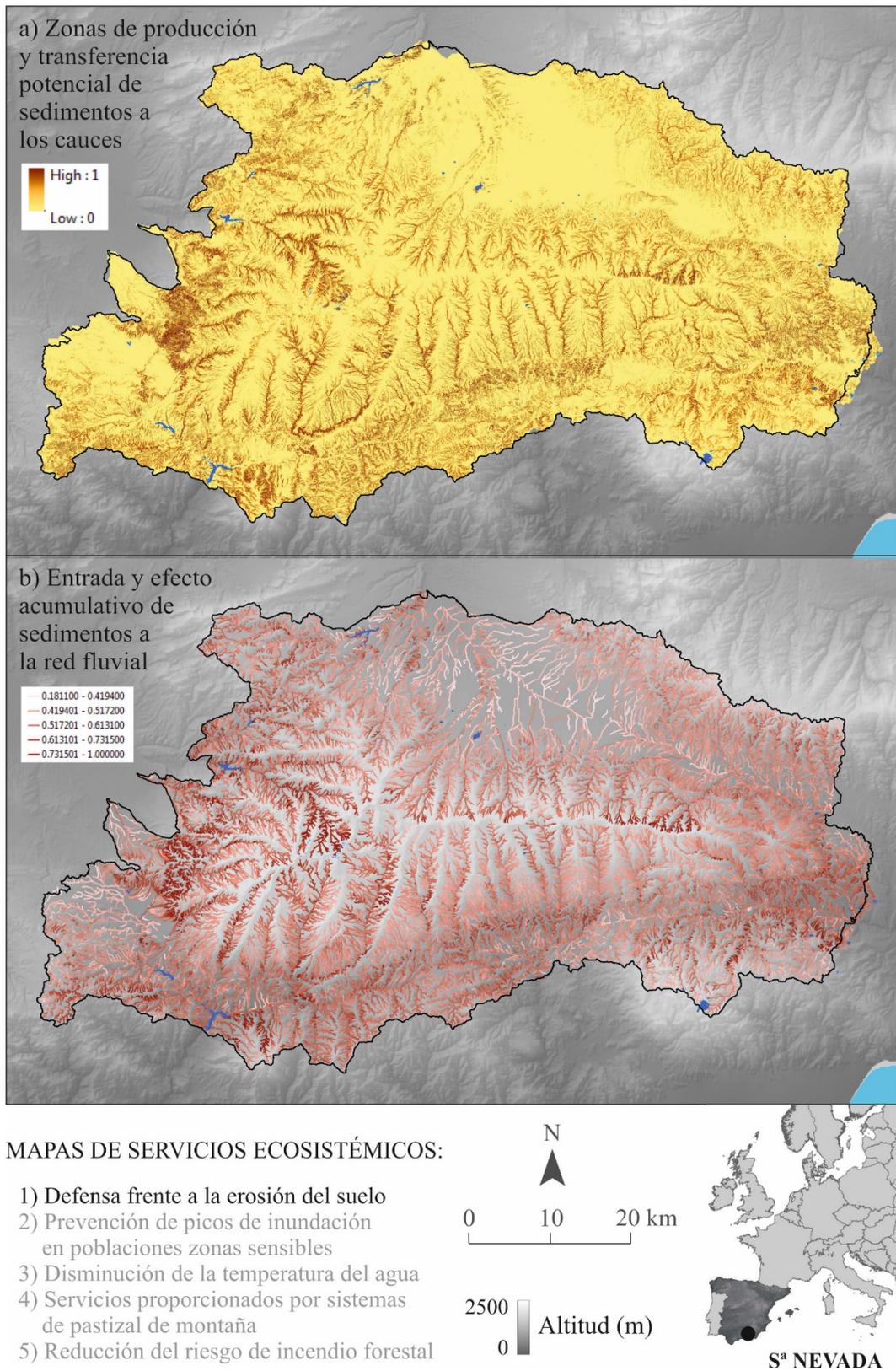


Figura 49. Mapas de ayuda a la toma de decisiones para generación de servicio ecosistémico de defensa frente a la erosión del suelo en el PPNN de Sierra Nevada.

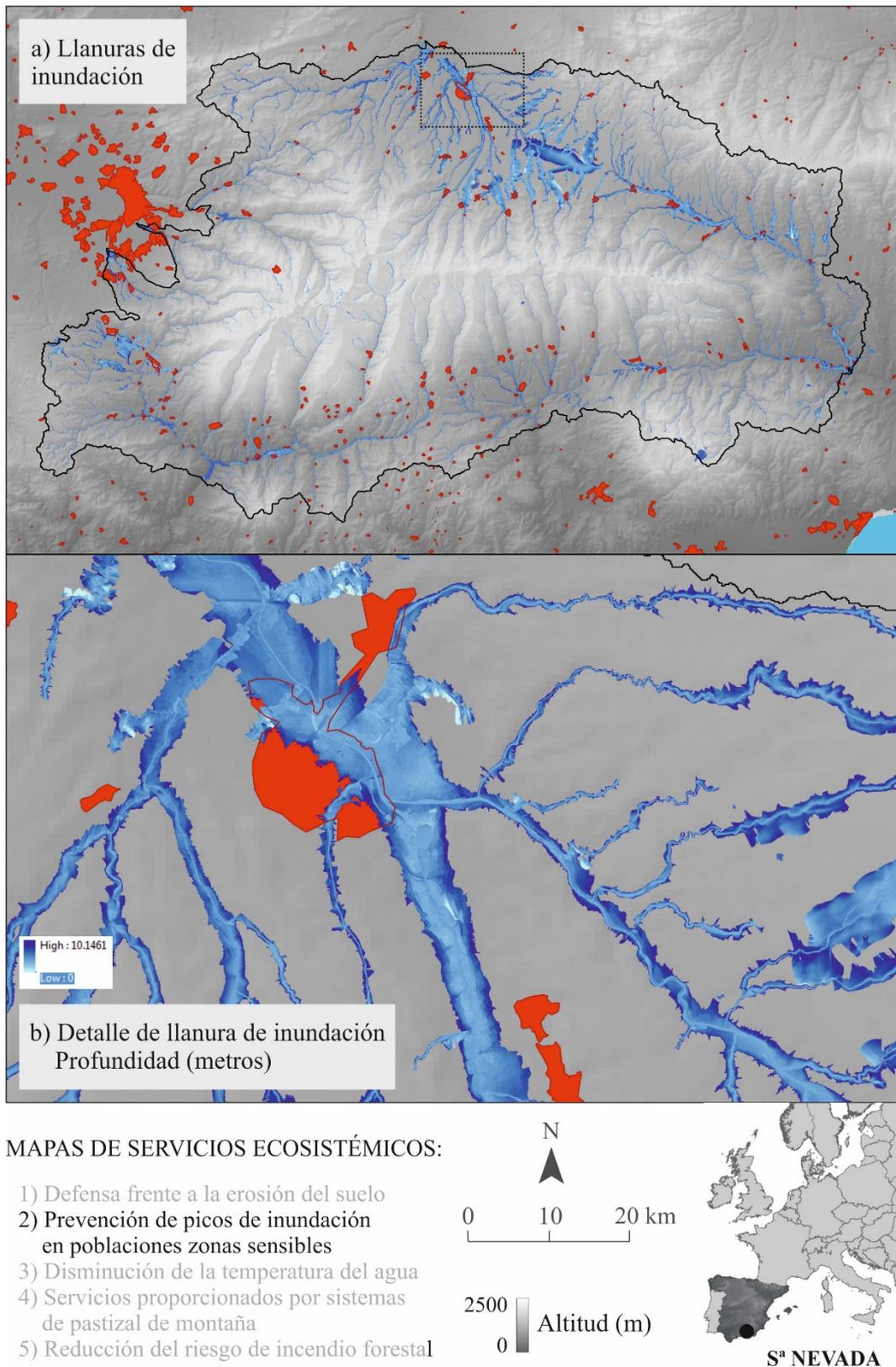


Figura 50. Mapas de ayuda a la toma de decisiones para generación de servicio ecosistémico de prevención de picos de inundación en zonas sensibles en el PPNN de Sierra Nevada. a) Panorama general de toda el área de estudio. b) Detalle de zonas urbanas en plena llanura de inundación.

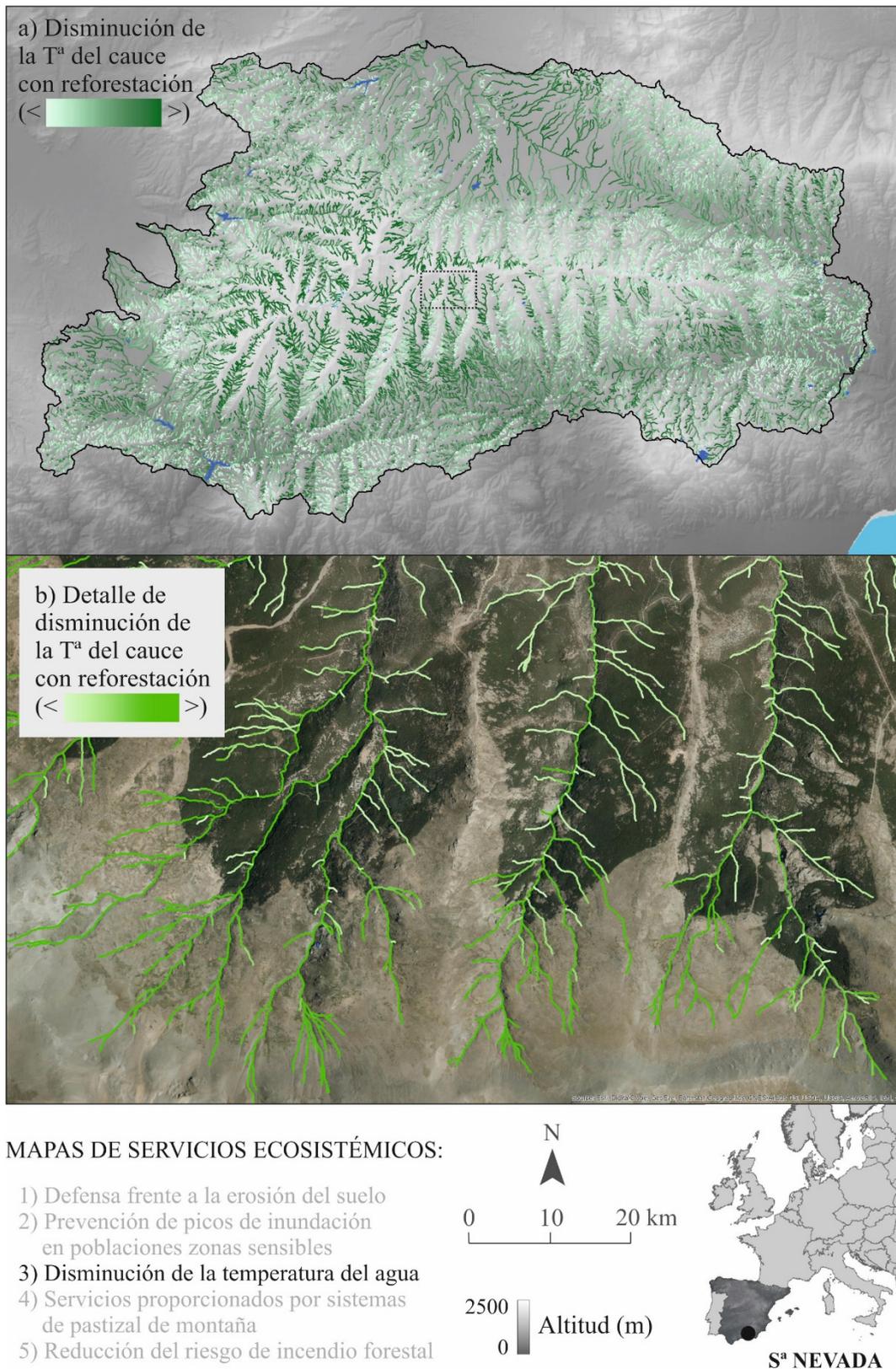


Figura 51. Mapas de ayuda a la toma de decisiones para generación de servicio ecosistémico de disminución de la temperatura del agua en el PPNN de Sierra Nevada. a) Panorama general de toda el área de estudio. b) Detalle sobre ortofoto de cauces con diferente potencial de servicio.

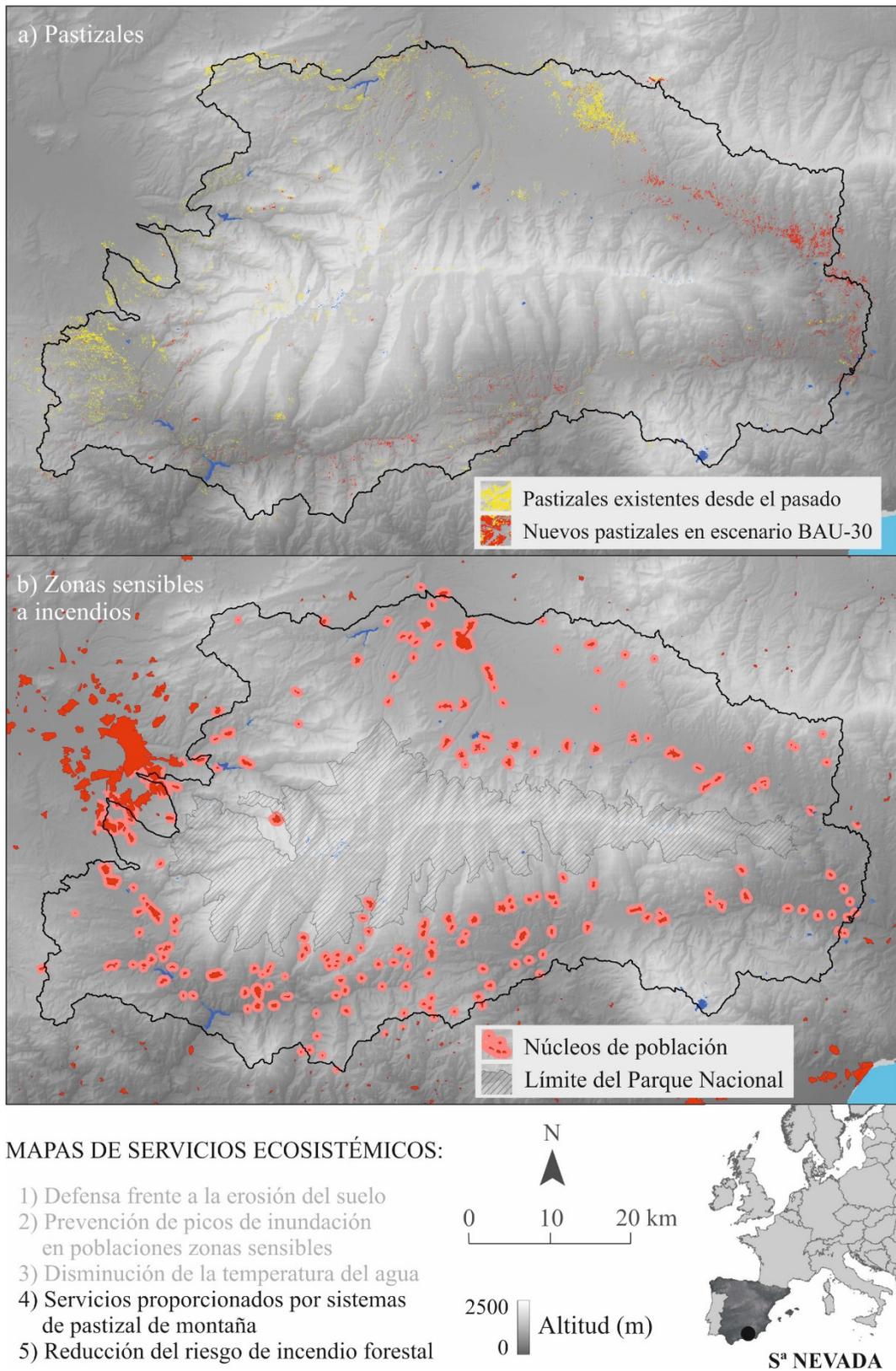


Figura 52. Mapas de ayuda a la toma de decisiones para generación de servicio ecosistémico: a) proporcionado por sistemas de pastizal de montaña (actuales y predichos), y b) reducción del riesgo de incendio forestal en zonas sensibles del PPNN de Sierra Nevada.

6.4. Propuesta final integrada

El análisis combinado de los cambios observados en el uso y ocupación del suelo, el modelado de servicios ecosistémicos y la valoración de los expertos de los 3 PPNN con las jornadas de trabajo, ha permitido generar una propuesta integrada de red de infraestructura verde para cada una de las 3 áreas de estudio mediante un consenso (analítico y reflexivo) de todas las partes. Esta propuesta concentra el conocimiento técnico generado durante las actividades anteriores, y constituye una herramienta eficaz para el diseño e implementación de estrategias de red de Infraestructura Verde.

La cartografía resultante estratificará el territorio para este fin en áreas con diferentes potencialidades de integración en la red según el servicio ecosistémico perseguido. Como ya se ha explicado, son multitud de beneficios que la naturaleza aporta a la sociedad. IVERCAM se ha ocupado de forma específica de los 5 servicios descritos en el Apartado 6.2, los cuales pueden integrarse en una o varias de las tipologías generales de servicio que esta propuesta final integrada pretende satisfacer.

Servicios de abastecimiento. Son recursos o procesos de los ecosistemas naturales (bienes y servicios) que benefician directamente a los seres humanos. Se trata de bienes materiales que las personas obtienen de los ecosistemas, por ejemplo, el suministro de alimentos, agua, fibras, madera y combustibles. La biodiversidad es la diversidad existente entre los organismos vivos, que es esencial para la función de los ecosistemas y para que estos presten sus servicios.

Servicios de regulación. Son los beneficios obtenidos de la regulación de los procesos ecosistémicos, por ejemplo, la regulación de la calidad del aire y la fertilidad de los suelos, el control de las inundaciones y las enfermedades y la polinización de los cultivos. A menudo son invisibles y, por consiguiente, en la mayoría de los casos se dan por sentados.

Servicios de apoyo. Son necesarios para la producción de todos los demás servicios ecosistémicos, por ejemplo, ofreciendo espacios en los que viven las plantas y los animales, permitiendo la diversidad de especies y manteniendo la diversidad genética.

Servicios culturales. Son los beneficios inmateriales que las personas obtienen de los ecosistemas, por ejemplo, la fuente de inspiración para las manifestaciones estéticas y las obras de ingeniería, la identidad cultural y el bienestar espiritual.

De forma específica, los servicios modelados en IVERCAM e integrados en la red responden a un análisis multicriterio que optimiza la respuesta a todos ellos de forma conjunta, solucionando conflictos de intereses de forma objetiva y bajo opinión de experto:

- 1) tienen importancia en determinados procesos hidrológicos (erosión, inundación, temperatura del agua),
- 2) tienen influencia en el mantenimiento de la biodiversidad (animal, vegetal y acuática),
- 3) Se adecúan a los cambios que vayan a producirse sobre la estructura del paisaje (incendios, pastizales) maximizando servicios y manteniendo una estructura óptima. El territorio es categorizado en función de su vocación por las distintas tipologías de actuación: restauración del bosque de ladera, mantenimiento de pastos, conectividad, etc.

Este análisis multicriterio tiene 6 componentes, uno de los cuales deriva de la propuesta inicial de elementos de la red de Infraestructura Verde derivada del modelado de cambios

en el paisaje, pasados y futuros para el escenario BAU-30 años, y los otros 5 derivan de los 5 servicios ecosistémicos modelados bajo criterios de experto y tras la reunión con los agentes de los PPNN. Los componentes del sistema de decisión aportan elementos a la red de Infraestructura Verde dos niveles:

1) Algunos “añaden” cobertura forestal a la red en términos de:

- “conservación de bosques” (masas forestales ya existentes que deben ser preservadas),
- “restauración forestal natural” (nuevas masas forestales resultado de la sucesión secundaria y expansión forestal en el futuro) y “antrópica” (re poblaciones forestales con fines hidrológicos o conservacionistas).

Estos elementos están relacionados con la defensa frente a la erosión del suelo, la prevención de picos de inundación en zonas sensibles y la disminución de la temperatura del agua, servicios que se ven beneficiados con el incremento de la superficie y densificación forestal y procesos ecológicos asociados a nivel edafológico y biótico.

2) Otros elementos de la red “eliminan” cobertura forestal o bien persiguen su no expansión a zonas de coberturas no forestales. Los servicios perseguidos están relacionados con mantenimiento de pastizales y la reducción del riesgo de incendio forestal. El abandono del territorio y la consiguiente sucesión secundaria, con aumento de biomasa en los montes y zonas fondo de valle, fragmenta los pastizales existentes desde tiempos históricos, por un lado, al tiempo que aumenta la conectividad forestal causante del fenómeno de grandes incendios, de mayor intensidad y generalmente, mayor severidad en los efectos causados a los ecosistemas afectados.

De este modo, los indicadores espaciales de cada uno de los servicios modelados (erosión, inundación, temperatura del agua, pastizales e incendios), más los resultados del análisis de cambios en el paisaje (persistencia de los bosques y expansión forestal del pasado al presente y de este al escenario futuro BAU-30 años) son incluidos en un análisis GIS multivariante donde, en función de su signo y distribución espacial, se genera como resultado una red de Infraestructura Verde que maximiza, al mismo, toda una serie de servicios contrapuestos que coexisten en el espacio y en el tiempo y permite, jugando con escenarios de futuro y diferentes políticas y planes de acción, conocer los efectos más plausibles de nuestros programas de gestión territorial bajo tales escenarios.

Para la definición de esta red integrada, el análisis multicriterio ha reclasificado los indicadores de cada servicio, así como los mapas resultantes del análisis de ocupación del suelo, todos en formato raster, de la siguiente forma:

A) Masas forestales. Los mapas de ocupación del suelo se han reclasificado a dos niveles de cara a identificar los elementos vertebrales de la red, los sistemas forestales arbolados, principalmente, o vegetación natural en proceso de sucesión:

A.1 - identificando las formaciones forestales existentes en la actualidad como elementos a conservar dentro de la red de Infraestructura Verde (mapa del año 2018, actual).

A.2 - identificando las nuevas formaciones forestales que, según el análisis del cambio de uso del suelo del pasado a la actualidad y el modelo de futuro para el escenario BAU-30 años, para el año 2050, existirán entonces en el área de estudio.

B) Defensa frente a la erosión del suelo. Las zonas de producción y transferencia potencial de sedimentos a los cauces, que deben ser incluidas en la red y restauradas o conservadas según el caso, han sido identificadas como aquellas que se encuentran por encima del percentil 75 de la distribución de valores obtenidos en el modelo correspondiente producido por NetMap.

C) Prevención de picos de inundación en zonas sensibles. La restauración de llanuras de inundación y vegetación de ribera, cuyo objetivo es laminar la respuesta de incremento de caudal en zonas sensibles (afección a poblaciones, infraestructuras y usos del suelo productivos) han sido identificadas como aquellas que maximizan la respuesta en el entorno de zonas periurbanas, consideradas estas como un buffer de afección de 2m en torno a localidades. Sobre esta base automática de selección, algunas llanuras de inundación han sido seleccionadas con criterio de experto usando bases de datos de zonas de riesgo y conocimiento de las áreas de estudio.

D) Disminución de la temperatura del agua. Se han identificado los tramos de cauce fluvial donde la reducción temperatura del agua es más eficiente con la restauración de la vegetación de ribera, seleccionando aquellos que se encuentran por encima del percentil 75 de la distribución de valores obtenidos en el modelo correspondiente producido por NetMap.

E) Servicios proporcionados por sistemas de pastizal de montaña. Dos niveles:

E.1 - Aquellos pastizales de cierta entidad que se han mantenido como tales durante las últimas décadas aportan una serie de servicios a las sociedades humanas (pasto, biodiversidad, polinización, etc.) que deben ser incluidos como factores de la red de tal modo que se trata de evitar su desaparición ante los drivers de abandono y reforestación natural de cara a garantizar tales servicios.

E.2 - Los modelos de cambio de uso del suelo a futuro identifican igualmente una serie de nuevos pastizales que también son incluidos como elementos de restricción a la expansión forestal propuesta como eje vertebral de la red.

F) Reducción del riesgo de incendio forestal. La infraestructura verde presentará igualmente restricciones en la continuidad de las masas forestales en las zonas periurbanas más cercanas a núcleos de población (buffer de 0.5 km), manteniendo de este modo menos combustible en los montes y terrenos circundantes de mayor riesgo de afección a viviendas y uso del suelo productivos del entorno de asentamientos humanos.

Los raster resultantes han sido reclasificados a 20m de tamaño de pixel con valor 1 en todos los casos. A continuación, se ha aplicado la siguiente fórmula para definir la red de Infraestructura Verde integrada, sumando y ponderando valores en base a los objetivos descrito en el proyecto y los objetivos específicos de los servicios ecosistémicos perseguidos:

$$\text{GIN} = (\text{A.1} + \text{A.2} + \text{B} + \text{C} + \text{D}) - (\text{E.1} + 0.5 \cdot \text{E.2} + \text{F})$$

El resultado del análisis multicriterio para cada PPN se muestra en las Figuras 53, 54 y 55.

Picos de Europa. Gran expansión forestal y mantenimiento de pastizales amplio.

Sierra de Guadarrama. Niveles medios de expansión y algunas manchas de pastizales.

Sierra Nevada. Bajo nivel de rewilding y sistemas de pastizales muy localizados.

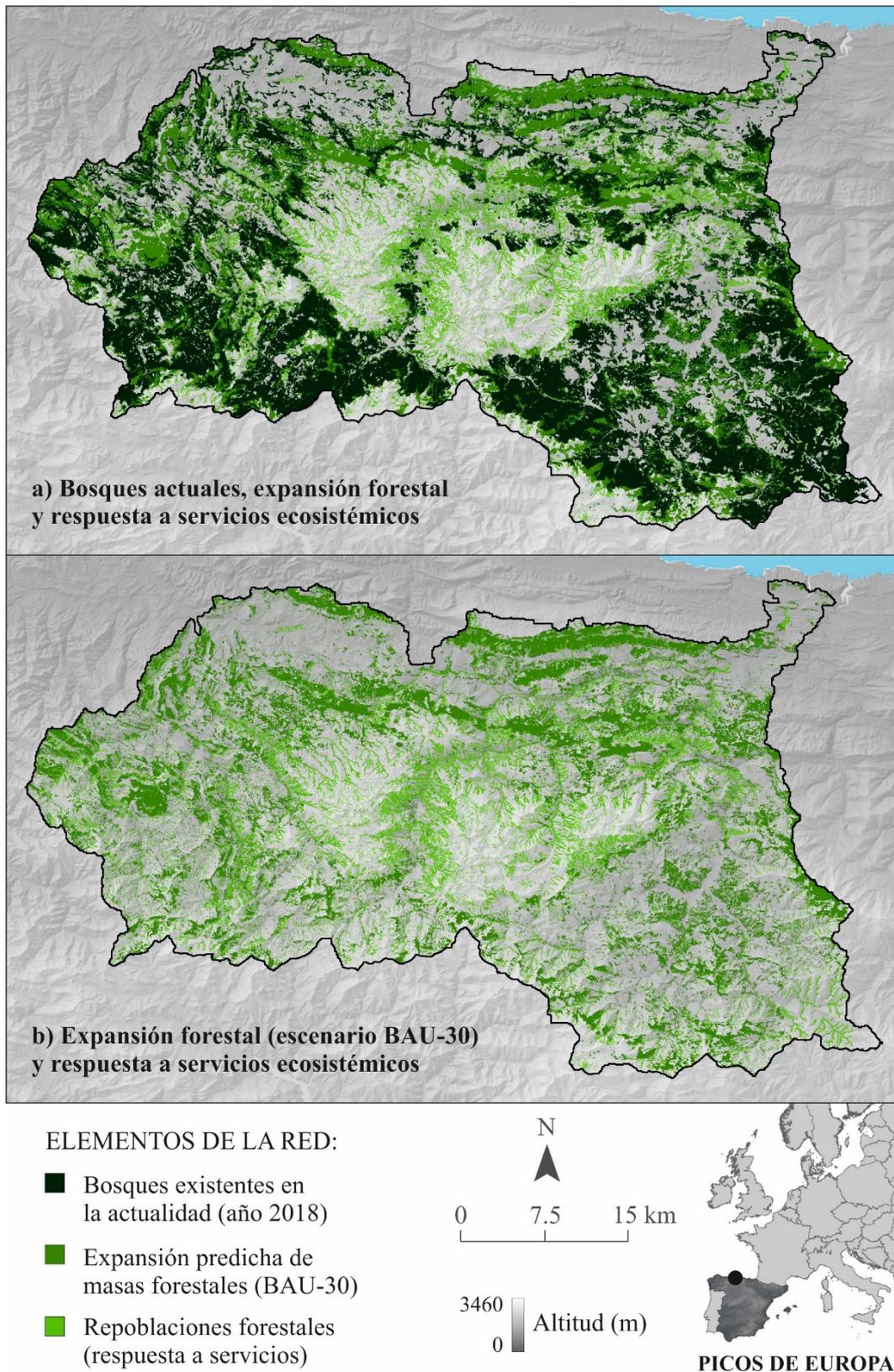


Figura 53. Propuesta de red de Infraestructura Verde del PPNN de Picos de Europa. a) Valor multicriterio de integración de indicadores (bosques existentes, expansión forestal, defensa frente a erosión e inundación y reducción de T^a del agua, frente a mantenimiento de pastizales y reducción del riesgo de incendio). b) Red sin bosques existentes.

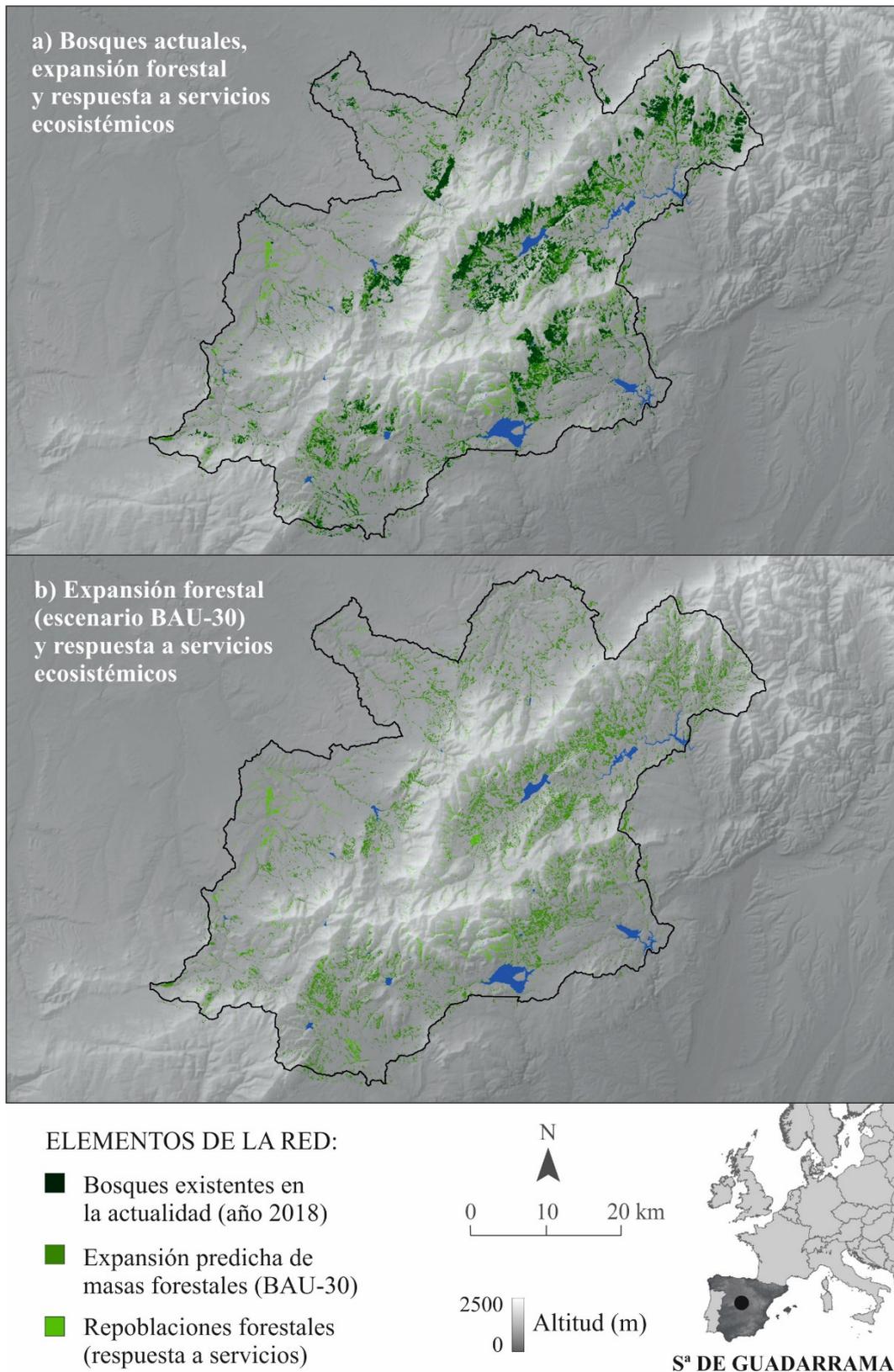


Figura 54. Propuesta de red de Infraestructura Verde del PPNN de Sierra de Guadarrama. a) Valor multicriterio de integración de indicadores (bosques existentes, expansión forestal, defensa frente a erosión e inundación y reducción de T^a del agua, frente a mantenimiento de pastizales y reducción del riesgo de incendio). b) Red sin bosques existentes.

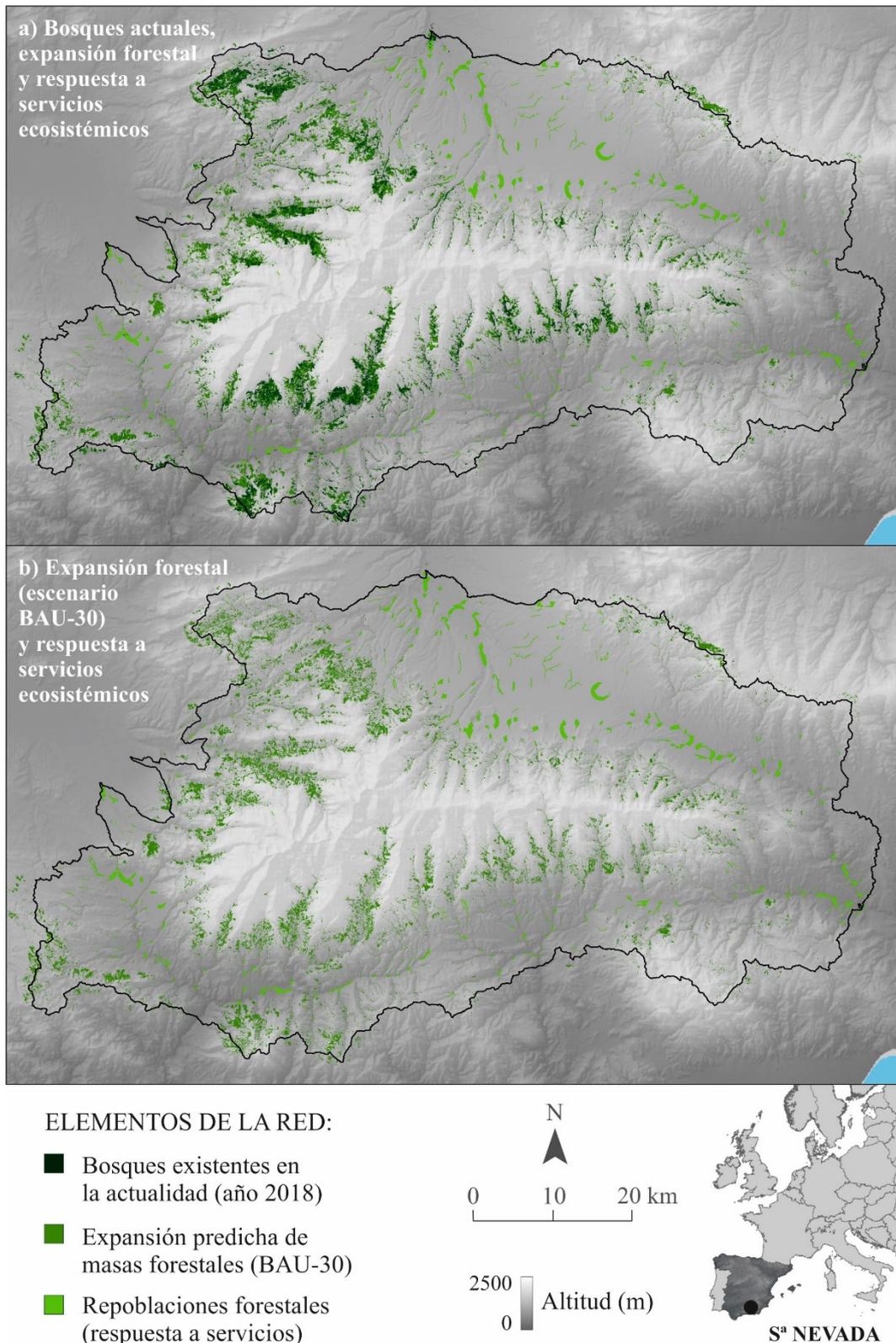


Figura 55. Propuesta de red de Infraestructura Verde del PPNN de Sierra Nevada. a) Valor multicriterio de integración de indicadores (bosques existentes, expansión forestal, defensa frente a erosión e inundación y reducción de T^a del agua, frente a mantenimiento de pastizales y reducción del riesgo de incendio). b) Red sin bosques existentes.

Los elementos de la red se disponen de forma estructurada por el territorio, conformando manchas y corredores de diferente naturaleza que, desde un punto de gestión territorial y con criterio de experto, deberán ser evaluados de forma específica, en cada punto del territorio, utilizando criterios adicionales a los utilizados en este trabajo y de mayor resolución temática, espacial o temporal.

En cualquier caso, los bosques existentes desde tiempos históricos (obtenidos mediante el análisis de cambios del paisaje desde 1985), los nuevos bosques surgidos por expansión forestal en las últimas décadas o predichos de cara al futuro y los elementos de paisaje (nuevos a crear dentro de la red o ya existentes como sistemas forestales) pueden ser cuantificados en términos de superficie y presentados en mapas de forma espacialmente explícita, como muestran las figuras anteriores. La Tabla 14 y la Figura 56 indican las áreas y % de ocupación en cada PPN N de estos elementos de la red de Infraestructura Verde propuesta por IVERCAM, cuyo manejo en los instrumentos de gestión y planificación del territorio darían cuenta de una respuesta multicriterio que optimiza, al mismo tiempo, la dinámica de los paisajes de montaña y la respuesta a una variedad de servicios ecosistémicos relacionados con los sistemas acuáticos de estos sistemas montañosos protegidos.

Elementos de la red de Infraestructura Verde	Picos de Europa	Guadarrama	Sierra Nevada
Conservación de bosque	26%	5%	2%
Conservación de bosque + servicio	4%	0%	0%
Expansión forestal	17%	6%	5%
Expansión forestal + servicio	3%	0%	0%
Respuesta a servicio	7%	1%	1%
<i>Total área cubierta por la GIN</i>	57%	12%	8%
<i>Área no cubierta por la GIN</i>	43%	88%	92%

Tabla 14. Porcentaje de ocupación, para cada PPNN, de los diferentes elementos de la red de Infraestructura Verde (bosques existentes, expansión forestal, respuesta a servicios ecosistémicos) y sus posibles combinaciones. Nótese que nunca hay combinación de persistencia del bosque y expansión forestal.



Figura 56. Porcentaje de ocupación, para cada PPNN, de la red de Infraestructura Verde (bosques existentes, expansión forestal, respuesta a servicios ecosistémicos).

6.5. La red de Infraestructura Verde en el contexto de la dinámica hidrológica de los sistemas de cuenca analizados

Como se ha podido comprobar en la modelización hidrológica realizada, el cambio climático tendría como principales consecuencias un descenso generalizado de la precipitación y un aumento de la temperatura, de mayor intensidad cuanto más al sur del gradiente climático en el que se distribuyen las 3 zonas de montaña seleccionadas nos encontremos. En relación con la precipitación, especial relevancia adquiere la nieve en la dinámica hidrológica de estas áreas. Se espera una reducción acusada de los días y el volumen de nieve en las zonas medias y altas de los Parques. Esto es especialmente relevante en el funcionamiento de los sistemas hídricos asociados a los mismos, con un régimen nival muy marcado en el que los deshielos primaverales suponen en buena parte de las aportaciones de los cursos de montaña (especialmente en Sierra Nevada). El efecto laminador que supone la nieve en estos tipos de sistemas se perdería, por lo que adquiriría todavía más sentido la integración de un Infraestructura Verde que garantice una mayor capacidad retentiva de agua que asegure un caudal basal más alto durante los períodos de estiaje.

Otro efecto directo de la pérdida de nieve y aumento de la temperatura es el incremento de la temperatura del agua en los ríos. Dicha variable es una de las que controlan el funcionamiento general de los sistemas acuáticos, por lo que dinámicas asociadas a la composición y estructuras de las comunidades y al metabolismo fluvial se verían directamente afectadas. En este sentido, adquieren especial importancia los buffers riparios diseñados en la red a lo largo de los pequeños ejes de cabecera y zonas media de montaña en la que la cobertura arbórea podría reducir la energía solar incidente, tamponando parte del incremento térmico consecuencia del cambio climático. Además, diversos estudios llevados en acabo en cuencas experimentales (Johnson and Jones, 2000; Rishel et al., 1981) han señalado la relación entre cobertura forestal en la cuenca y una disminución de la temperatura del agua en los cursos fluviales. La integración en las redes de infraestructura verde de zonas potenciales de expansión y mantenimiento del bosque tendrían por tanto un efecto positivo en este aspecto.

Se ha visto anteriormente como en el escenario de futuro se prevé una reducción drástica de eventos extremos de precipitación, especialmente en la Sierra de Guadarrama y Sierra Nevada. En Picos de Europa, la incidencia será menor, por lo que a la hora de diseñar la red se les ha dado una relevancia especial a actuaciones de apertura y restauración de llanuras de inundación, con el objetivo de reducir la frecuencia e intensidad de inundaciones en los fondos de valle ante eventos extremos de precipitación y/o deshielo. Este tipo de actuaciones lograrían reducir la incidencia de inundaciones en núcleos urbanos promoviendo actuaciones de disipación de la energía de la avenida aguas arriba de estas zonas de interés. Además, estudios desarrollados en el IH Cantabria (Belmar, 2018) han mostrado como la madurez de los sistemas forestales incide positivamente en la estabilidad hidrológica de los sistemas de cuenca: reduciendo picos de caudales altos y tamponando sequías durante los meses de estiaje. En este sentido, la recuperación de superficie forestal y, sobre todo, el permitir que este alcance condiciones importantes de madurez (i.e. favorecimiento de la sucesión secundaria) supondría otro aporte importante de la red de Infraestructura Verde diseñada. Por último, el aumento de la superficie forestal (especialmente del bosque natural de frondosa y matorral), influiría positivamente en la reducción de la erosión que, como se ha visto fruto de los modelados hidrológicos

realizados, es más más notable en las zonas altas y escarpadas de los macizos montañosos. Pese a que las proyecciones de futuro indican una presumible reducción del sedimento generado en las tres zonas de montaña por efecto de la disminución de los eventos de precipitación, buena parte de esta reducción se debe a los cambios en los usos del suelo esperados. Por ello, el mantenimiento de esta tendencia de expansión y maduración de los ecosistemas forestal y matorral debe ser contemplada como un elemento fundamental del diseño de la Infraestructura Verde para apoyar esta tendencia y no condicionarla negativamente.

Por otro lado, de acuerdo con la modelización hidrológica realizada, la implantación de una infraestructura verde como la que se ha diseñado traería consigo un efecto negativo especialmente relevante desde el punto de vista de la planificación hidrológica: la reducción del volumen de agua en los sistemas de cuenca a consecuencia del aumento de la evapotranspiración por efecto del incremento de la superficie forestal. Este hecho es especialmente notorio en el PN de los Picos de Europa y su entorno, en el que la fuerte expansión del bosque que se ha proyectado en el escenario de cambio de paisaje futuro se convierte en el principal responsable de la disminución del caudal de los ríos (más incluso que el descenso de la precipitación). Los paisajes en Sierra Nevada y Sierra de Guadarrama se mantienen más estáticos por lo que, aunque la evapotranspiración aumenta, no influye tanto en las reducciones de caudal obtenidas. Sin embargo, el hecho de incrementar con la red de infraestructura verde la cobertura de frondosa supondría una mayor pérdida de agua por lo comentado anteriormente, con el agravante de tratarse además de ambientes mediterráneos más limitados por la disponibilidad hídrica. Pero, ¿hasta qué punto esta relación entre aumento de la vegetación y aumento de la evapotranspiración es tan directa? Desde luego, los modelos hidrológicos siempre lo han considerado de esta manera fundamentado, evidentemente, en el comportamiento fisiológico e individualizado de la vegetación. Investigaciones empíricas realizadas en este instituto van más en la línea con otras corrientes que proponen una mayor complejidad en esta relación, en base sobre todo a una interacción con el horizonte h del suelo de las masas forestales (especialmente de frondosas), que funcionaría como un primer reservorio de la humedad del suelo. El intercambio entre estos tres sistemas (panta, suelo y atmósfera) debería ser más estudiado para completar la dinámica de este proceso, aunque presumiblemente mejoraría la respuesta hidrológica de las cuencas, laminando crecidas y tamponando estiajes en los sistemas fluviales.

6.6. Transferencia y difusión de los resultados del proyecto

La red de Infraestructura Verde propuesta para cada PPNN, como se ha explicado, da buena cuenta de los objetivos planteados en IVERCAM, integrando el conocimiento técnico generado durante las actividades del proyecto en los instrumentos de gestión y ordenación de los espacios naturales protegidos. Los resultados más relevantes, así como las herramientas desarrolladas y utilizadas para conseguirlos, han sido difundidos en diferentes medios a lo largo del proyecto y, continúa en la actualidad este proceso de difusión. De forma específica, la transferencia y difusión de resultados ha incidido en el hecho diferencial de los 3 PPNN de estudio, entre los que existe un gradiente latitudinal que maximiza los efectos del cambio climático en el funcionamiento ecosistémico, tanto a nivel terrestre como acuático.

Las acciones de difusión han incluido la preparación seminarios técnicos en Oviedo, Madrid y Granada durante las jornadas de reunión con expertos de cada uno de los PPNN, la generación de la página web del proyecto (<http://ivercam.ihcantabria.es>), publicaciones en medios de comunicación convencionales (prensa, radio) y redes sociales para el libre acceso del público general a las novedades y resultados del proyecto. Se ha organizado igualmente un taller especializado en la aplicación y manejo de las herramientas de planificación de infraestructura verde para zonas de montaña, que ha tenido lugar en IH Cantabria al inicio del proyecto. En el seminario ha habido participantes de diferentes campos (científicos, gestores y otros grupos de interés) y se han establecido relaciones entre los distintos responsables de la gestión de los espacios naturales protegidos. Como resultado final, se han desarrollado publicaciones científicas y divulgativas en diversos medios de difusión en las que se incluyan las principales conclusiones alcanzadas y futuras líneas de investigación en esta temática.

De forma específica y en orden cronológico, se listan a continuación las acciones desarrolladas en medios de comunicación provinciales y nacionales:

23/11/2017: Creación de un proyecto en Researchgate

<https://www.researchgate.net/project/IVERCAM-Project-Developing-an-approach-to-Implement-Green-Infrastructure-networks-as-an-adaptive-measure-against-climate-Change-in-Mountain-areas-of-the-Iberian-Peninsula>

01/12/2017: Creación de la página web del proyecto

<http://ivercam.ihcantabria.es>

01/12/2017: Creación de logo del proyecto

04/12/2017: Envío de nota de prensa a diversos medios acerca del inicio del proyecto:

05/12/2017. Publicación en "eldiario.es"

http://www.eldiario.es/norte/cantabria/ultima-hora/IHCantabria-Europa-Sierra-Nevada-Guadarrama_0_715329419.html

05/12/2017. Publicación en "LA VANGUARDIA"

<http://www.lavanguardia.com/local/cantabria/20171205/433442294792/ihcantabria-pone-en-marcha-un-proyecto-de-adaptacion-al-cambio-climatico-en-picos-de-europa-sierra-nevada-y-guadarrama.html>

05/12/2017. Publicación en "europa press"

<http://www.europapress.es/cantabria/noticia-ihcantabria-desarrolla-proyecto-adaptacion-cambio-climatico-20171205184157.html>

06/12/2015. Publicación en "EL DIARIO MONTAÑÉS"

<http://www.eldiariomontanes.es/cantabria/picos-europa-escenario-20171206191242-nt.html>

11/12/2017. Publicación en "iagua"

<https://www.iagua.es/noticias/ih-cantabria/adaptacion-al-cambio-climatico-picos-europa-sierra-nevada-y-guadarrama-estudio>

11/12/2017. Publicación en "DegustaCastillaLeón"

<http://www.degustacastillayleon.es/el-dia-de-las-montanas-y-el-cambio-climatico/>

05/12/2017: Creación de un proyecto en linkedin

<https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:6343722098028007424/>

05/12/2017: Presentación del proyecto en twitter

<https://twitter.com/IHCantabria/status/937955841340297216>

01/01/2018: Publicación en "LA VANGUARDIA"

<http://www.lavanguardia.com/vida/20180101/434016615697/invertir-en-infraestructuras-verdes-para-adaptarse-mejor-al-cambio-climatico.html>

02/01/2018: Publicación en "Diario de León.es"

http://www.diariodeleon.es/noticias/provincia/proyecto-impulsa-infraestructuras-verdes-adaptarse-cambio-climatico_1215563.html

02/01/2018: Publicación en "EL COMERCIO"

<http://www.elcomercio.es/asturias/oriente/simulaciones-adaptar-parque-20180102001012-ntvo.html>

02/01/2018: Publicación en "HIDROBLOG"

<http://hidroblog.com/2018/01/02/ivercam-proyecto-infraestructuras-verdes-adaptarse-al-cambio-climatico/>

10/07/2018: Envío de un abstract sobre los resultados del proyecto IVERCAM a la 1st Meeting of the Iberian Ecological Society (SIBECOL), que tendrá lugar en febrero de 2019.

A continuación, se aporta una captura de pantalla de la confirmación de recibo de dicho abstract. Esta presentación oral se espera que sea también publicada en forma de artículo científico durante el año 2019.

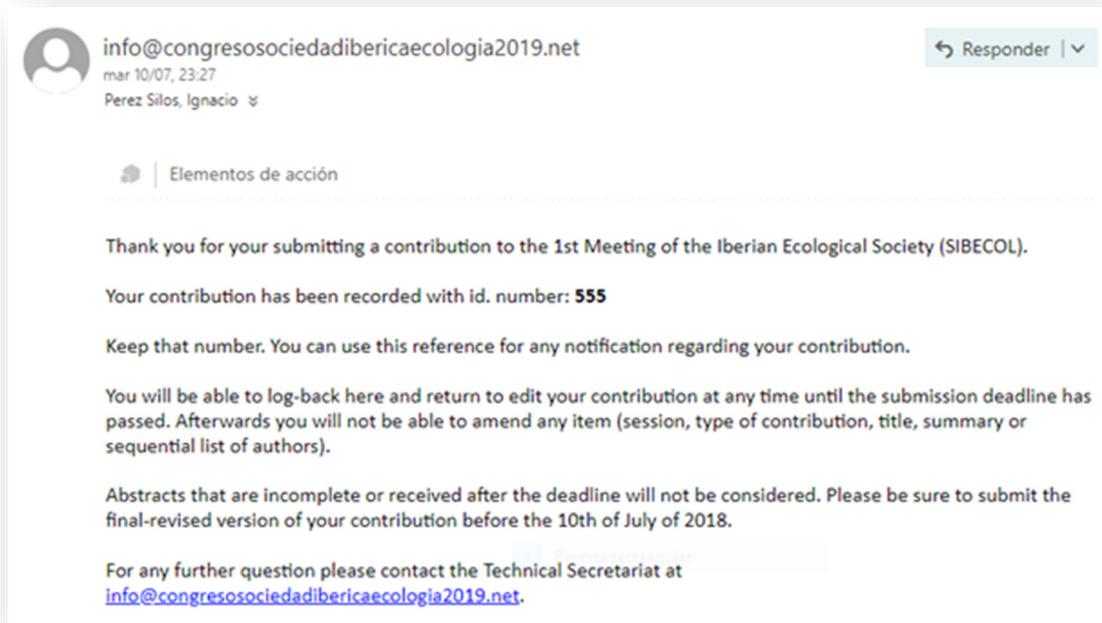


Figura 57. Confirmación de recepción del abstract para participar durante el próximo año en el congreso SIBECOL.

7. CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE FUTURO

El futuro social, cultural y económico de la población española, y del resto del mundo, depende en gran medida del buen funcionamiento de los ecosistemas acuáticos y terrestres españoles y de la biodiversidad y servicios que aportan a las sociedades humanas. El bienestar estriba, de esta forma, en la capacidad de los ecosistemas para generar servicios esenciales: agua limpia, alimentos, regulación climática, polinización, actividades recreativas, etc. Por tanto, la conservación de los ecosistemas, además de ser una responsabilidad ética, se presenta como una necesidad crucial, y no como un lujo, para el bienestar de la sociedad en general.

Para ello resulta crucial contar con información científica fiable sobre la dinámica de los paisajes y el funcionamiento de los ecosistemas, y así fomentar su difusión y consideración en la toma de decisiones. Esta necesidad de reforzar la relación entre el conocimiento científico y la toma de decisiones ha sido reconocida también a nivel internacional. En junio de 2010 se alcanzó un acuerdo sobre el establecimiento de un órgano intergubernamental (conocido por sus siglas, IPBES) para la integración de la información sobre biodiversidad y servicios de los ecosistemas, de forma que sea accesible para la toma de decisiones técnicas y políticas. La importancia de evaluar y valorar adecuadamente la biodiversidad y los servicios de los ecosistemas también se ha destacado en el Plan Estratégico 2011-2020 del Convenio de Naciones Unidas sobre Diversidad Biológica y en la Estrategia de la Unión Europea sobre biodiversidad para 2020. La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio de España (EME), promovida por la Fundación Biodiversidad del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino desde el año 2009 siguiendo la iniciativa de las Naciones Unidas, tiene la finalidad de generar información robusta, validada científicamente, sobre la relevancia de los servicios de los ecosistemas en España y su importancia para el bienestar de nuestra sociedad.

En este sentido, los resultados del proyecto IVERCAM aportan una valiosa información sobre el estado y las tendencias de los servicios de los ecosistemas terrestres y acuáticos españoles, tomando como caso de estudio 3 PPNN de montaña distribuidos en un marcado gradiente latitudinal, y sobre las consecuencias que tienen la degradación de los paisajes en España, o alternativamente su recuperación en zonas marginales de montaña, en el bienestar de las sociedades humanas pasadas, presentes y futuras. Las conclusiones obtenidas están especialmente dirigidas a los gestores, y su principal mensaje consiste en tender puentes entre el conocimiento científico interdisciplinar y la toma de decisiones, mostrando los estrechos vínculos que existen entre la conservación de los ecosistemas y el bienestar humano de las generaciones actuales y futuras, evidenciando la importancia que tienen los ecosistemas y la biodiversidad para nuestro desarrollo sostenible.

7.1. Conclusiones generales del proyecto

La estructura y composición del territorio muestran una clara influencia antrópica en los 3 PPNN de estudio, conformando un típico modelo de paisaje agroforestal en un ambiente rural de montaña. La fuerte presión demográfica registrada hasta mediados de siglo XX obligó a la puesta en cultivo de todas aquellas tierras susceptibles de ser aprovechadas, con lo que el paisaje pasó a tener un elevado grado de humanización. La mayoría de los bosques fueron destruidos para la obtención de nuevos pastos y para la extracción de madera, incrementándose asimismo las formaciones de matorral como consecuencia de la

acción del fuego. Más recientemente, al igual que en otras áreas rurales de la geografía peninsular, la intensa despoblación y abandono de las tierras de cultivo ha permitido la progresiva recolonización natural de la vegetación. Únicamente las tierras más rentables y mejor situadas han visto intensificada (o al menos mantenida) su producción, quedando el resto del territorio en desuso. De este modo, la dinámica del paisaje se caracteriza por una creciente expansión de los sistemas forestales. De forma intermitente, el proceso de recuperación vegetal se ha visto truncado por la existencia de incendios y la apertura de repoblaciones forestales de carácter productivista o de restauración hidrológico forestal, en menor medida. Su probabilidad de ocurrencia está condicionada por las características de la vegetación en un determinado momento (muy influenciadas a su vez por las restricciones ambientales), la gestión forestal, tanto a nivel público como por parte de los particulares, así como por la historia de fuego acontecida en el pasado. Este nuevo escenario debe ser considerado además desde la perspectiva climática de los ambientes mediterráneos en el contexto de cambio global, que combinan las altas temperaturas estivales con un importante déficit hídrico, lo que propicia, sobre todo en exposiciones de solana, situaciones críticas de riesgo de incendio. Al mismo tiempo, los procesos de abandono del uso agrícola pueden incrementar significativamente su probabilidad de ocurrencia, bien sea por el aumento de combustible en el monte (debido a la recolonización vegetal o la densificación de la vegetación), o bien por las repoblaciones forestales con especies altamente inflamables, como el pino. Como resultado, los 3 PPNN presentan una compleja dinámica paisajística y heterogeneidad estructural con múltiples repercusiones en los flujos bióticos y abióticos. En este sentido, la calidad del agua de ríos de montaña tiene una estrecha relación con la cubierta vegetal. Numerosos estudios han demostrado que el incremento de la superficie forestal disminuye la escorrentía y aumenta la infiltración, regulando los caudales originados por fuertes aguaceros, retrasando el punto de encharcamiento y controlando eficazmente su potencial erosivo y de transporte de sedimentos. Opuestamente, su eliminación incrementa la escorrentía superficial, las pérdidas de suelo por erosión y la contaminación difusa de los cauces receptores. En un escenario de cambio global, cualquier iniciativa de planificación y gestión del territorio debería tener en cuenta la fragilidad de las zonas de montaña, donde las interacciones entre naturaleza y actividades humanas alcanzan un equilibrio más inestable, afectando no sólo a la estructura, sino también a la función del territorio y con ello, a los servicios ecosistémicos de los que dependen en buena medida las sociedades humanas.

El gradiente climático a lo largo del cual se disponen las tres áreas de montaña estudiadas ha sido uno de los principales condicionantes en el diseño de las redes de infraestructura verde planificadas. En ellas se espera una reducción muy relevante de las aportaciones de agua, así como un incremento fuerte de la temperatura. Sin embargo, estos no tendrán ni la misma intensidad ni los mismos efectos en las tres zonas estudiadas. Así, mientras que en el P.N de Picos de Europa los cambios en los usos del suelo (fuerte incremento de la superficie forestal) fue el principal motor de cambio con respecto a la hidrología, en el P.N. de Sierra de Guadarrama y P.N. de Sierra Nevada el paisaje se muestra más estático, siendo las variaciones sobre precipitación, nieve y temperatura los principales impactos sobre la dinámica hidrológica. En este aspecto, en el P.N de Picos se proponen mayoritariamente soluciones basadas en el favorecimiento de la sucesión secundaria y la protección de los pastos considerados como más relevantes desde el punto de vista ganadero. En los sistemas mediterráneos (P.N. de Sierra de Guadarrama y P.N. de Sierra

Nevada), el diseño y la gestión de la IV debería centrarse en fomentar activamente la transición conífera-frondosa como elemento de protección frente a incendios y de mejora del funcionamiento hidrológico y edafológico.

7.2. Trabajos futuros en el corto y medio plazo

Los resultados obtenidos en este proyecto evidencian la estrecha relación existente entre la estructura del paisaje y la vegetación terrestre, así como otros factores no estudiados como el suelo o la biota existente, y los procesos hidrológicos que afectan a los cauces receptores a nivel de procesos de inundación de zonas urbanizadas, pérdidas de suelo por erosión o cantidad y calidad de agua para abastecimiento. No obstante, a pesar de los resultados satisfactorios obtenidos, queda mucho trabajo que realizar en esta línea de investigación para entender adecuadamente las relaciones causa efecto establecidas en los sistemas continentales debido a las interacciones establecidas desde tiempos históricos entre la acción antrópica y los procesos naturales.

Por un lado, se ha trabajado en medio terrestre a nivel de paisaje, usando las unidades fisionómicas básicas de vegetación como las tipologías a usar en la clasificación de la ocupación del suelo. Se trata de una leyenda demasiado grosera para dar cuenta de muchos procesos de interés que ocurren en el medio terrestre y que pueden afectar, positiva o negativamente, al funcionamiento fluvial y los servicios que los ríos aportan a las sociedades humanas. El uso de tipologías de vegetación más detalladas, como puede ser el sistema EUNIS, en el que se basa la Lista Patrón de Hábitats Terrestres de España, permitiría entender mejor los procesos de dinámica territorial, el estado de las sucesiones ecológicas y las tendencias a futuro del territorio, en sentido amplio. Estas tipologías más detalladas, a la vez, ayudarían a describir patrones de biodiversidad en base a criterios como la Red Natura o las Listas Rojas de especies y comunidades, descritas a varios niveles administrativos, desde el autonómico al nacional y europeo.

Por otro lado, los modelos hidrológicos no han sido capaces de dar respuesta a todas las preguntas planteadas en los objetivos del proyecto debido a su parametrización sencilla o no inclusión de variables clave relacionadas con la estructura vegetal o las propiedades del suelo. Los cambios detectados en las variables termopluviométricas y la estructura del paisaje en el periodo de estudio, de tan solo algunas décadas, no han permitido generar cambios de suficiente importancia que provoquen una respuesta significativa en la salida de los modelos. Dicho de otro modo, se necesita un periodo de tiempo de estudio más larga, y cambios muy acusados para que los modelos actuales muestren las relaciones causa efecto en la terna clima-paisaje-respuesta hidrológica, o más bien, de forma alternativa, se necesitan modelos más sensibles y mejor parametrizados para detectar las respuestas asociadas incluso a cambios paisajísticos o climáticos de menos entidad, que son por otro lado de aquellos de los que se dispone de datos más fiables y un mayor número de lugares. Esto se demuestra bien en la simplificación que hacen los modelos de la interacción suelo-agua y evapotranspiración, habiendo sido esta detectada como una de las cuestiones que deberían tratar de resolver los modelos hidrológicos en los próximos años.

No obstante, como ya se ha comentado en este informe, en este contexto de carencia de datos óptimos, los resultados de IVERCAM ha resultado no obstante satisfactorios y han permitido concluir que el fenómeno de rewilding o avance sucesional debido al abandono paulatino de la mayor parte de las zonas de montaña ha permitido una recolonización natural de antiguos pastizales en matorrales y estos en bosques en diferente estado desarrollo, lo que ha conformado una primera propuesta de GINs resultante de cartografiar el avance de formaciones forestales en las últimas décadas. Algunos servicios puntuales han requerido de análisis específicos de cara a identificar las zonas afectadas y proponer medidas que mejoren el servicio ecosistémico en cuestión, lo que podría traducirse de forma directa en medidas de gestión y planificación del territorio.

8. AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento a la AEMET por los datos aportados. Agradecemos al grupo de trabajo Couple Modelling del World Climate Research Programme, responsable del CMIP, y a los grupos de modelado climático (ver Tabla 2 de este documento) por producir y publicar los resultados de sus modelos. El Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison del U.S. Department of Energy brinda su apoyo en la coordinación del CMIP y el desarrollo de software en colaboración con la Global Organization for Earth System Science Portals.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Ahearn, D. S., R. W. Sheibley, R. A. Dahlgren, M. Anderson, J. Johnson, and K. W. Tate. 2005. Land use and land cover influence on water quality in the last free-flowing river draining the western Sierra Nevada, California. *Journal of Hydrology* 313 (3-4):234-247.
- Allan, D. J., and A. S. Flecker. 1993. Biodiversity conservation in running waters *BioScience* 1:32-43.
- Allan, J. D. 2004. Landscapes and Riverscapes: The Influence of Land Use on Stream Ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 35 (ArticleType: research-article / Full publication date: 2004 / Copyright © 2004 Annual Reviews):257-284.
- Álvarez-Martínez, J.-M., S. Suárez-Seoane, and E. De Luis Calabuig. 2011. Modelling the risk of land cover change from environmental and socio-economic drivers in heterogeneous and changing landscapes: The role of uncertainty. *Landscape and Urban Planning* 101 (2):108-119.
- Álvarez-Martínez, J., J. Stoorvogel, S. Suárez-Seoane, and E. Luis Calabuig. 2010. Uncertainty analysis as a tool for refining land dynamics modelling on changing landscapes: a case study in a Spanish Natural Park. *Landscape Ecology* 25 (9):1385-1404.
- Álvarez-Martínez, J. M. 2010. Análisis y modelado multiescalar de los efectos del cambio global sobre la dinámica y función del paisaje en espacios de montaña. Aplicaciones a la ordenación territorial., Biodiversidad y Gestión Ambiental, Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales, Universidad de León, León.
- Álvarez-Martínez, J. M., S. Suárez-Seoane, J. J. Stoorvogel, and E. de Luis Calabuig. 2014. Influence of land use and climate on recent forest expansion: a case study in the Eurosiberian-Mediterranean limit of north-west Spain. *Journal of Ecology* 102 (4):905-919.
- Álvarez-Martínez, J. M., B. Jiménez-Alfaro, J. Barquín, B. Ondiviela, M. Recio, A. Silió-Calzada, and J. A. Juanes. 2018. Modelling the area of occupancy of habitat types with remote sensing. *Methods in Ecology and Evolution* 9 (3):580-593.
- Baker, A. 2003. Land use and water quality. *Hydrological Processes* 17:2499-2501.
- Benayas, J. M., A. Martins, J. M. Nicolau, and J. J. Schulz. 2007. Abandonment of agricultural land: an overview of drivers and consequences. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources* 2:1-14.
- Benda, L., D. Miller, S. Lanigan, and G. Reeves. 2009. Future of applied watershed science at regional scales. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 90 (18):156-157.
- Cernusca, A., M. Bahn, N. Bayfield, and M. Cattizone. 1999. Land-use changes in mountain areas. In *Perspectives in Ecology. A glance from the VII International Congress of Ecology (Florence, July 1997)*, edited by A. E. Farina. Leiden: Backhuys Publishers, 502.
- CEDEX. (2016). Anuario de aforos 2013-2014.

- Chuvieco, E. 2000. Fundamentos de Teledetección espacial. Madrid: EDICIONES RIALP, S.A.
- Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. (1992). Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models. *Water Resources Research*, 28(4), 1015–1031.
- Elith, J., S. J. Phillips, T. Hastie, M. Dudík, Y. E. Chee, and C. J. Yates. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions* 17 (1):43-57.
- Engelund, F., & Hansen, E. (1967). A monograph on sediment transport in alluvial streams. Technical University of Denmark. Copenhagen: TEKNISKFORLAG. Retrieved from <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:81101b08-04b5-4082-9121-861949c336c9/>
- FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC. (2012). Harmonized World Soil Database (version 1.2). Rome, Laxenburg.
- Foley, J. A., R. DeFries, G. P. Asner, C. Barford, G. Bonan, S. R. Carpenter, F. S. Chapin, M. T. Coe, G. C. Daily, H. K. Gibbs, J. H. Helkowski, T. Holloway, E. A. Howard, C. J. Kucharik, C. Monfreda, J. A. Patz, I. C. Prentice, N. Ramankutty, and P. K. Snyder. 2005. Global Consequences of Land Use. *Science* 309 (5734):570-574.
- García-Ruiz, J. M., T. Lasanta, P. Ruiz-Flano, L. Ortigosa, S. White, C. González, and C. Martí. 1996. Land-use changes and sustainable development in mountain areas: a case study in the Spanish Pyrenees. *Landscape Ecology* 11 (5):267-277.
- Graham, L. P., Andréasson, J., & Carlsson, B. (2007). Assessing climate change impacts on hydrology from an ensemble of regional climate models, model scales and linking methods - A case study on the Lule River basin. *Climatic Change*, 81(SUPPL. 1), 293–307. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9215-2>
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 80–91. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2009.08.003>
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96–99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G. B. M., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M., Blagotić, A., ... Kempen, B. (2017). SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *Plos One*, 12(2), e0169748. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>
- Holliday, C. P., Rasmussen, T. C., & Miller, W. P. (2003). Establishing the Relationship Between Turbidity and Total Suspended Sediment Concentration. 2003 Georgia Water Resources Conference, 1–3.
- Hunsaker, C. T., and D. A. Levine. 1995. Hierarchical approaches to the study of water quality in rivers. *BioScience* 45 (3, Ecology of Large Rivers):193-203
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. In Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate

- Change, edited by S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller. Cambridge: IPCC, 1996.
- IIAMA. (2018). Descripción del modelo conceptual distribuido de simulación hidrológica TETIS v.9.0. Valencia.
- Johnson, S. L. and Jones, J. A. (2000). Stream temperature responses to forest harvest and debris flows in western Cascades, Oregon. *Canadian journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 57(Suppl. 2): 30-39.
- Julien, P. Y. (1998). *Erosion and sedimentation*. Cambridge University Press. Retrieved from https://books.google.es/books/about/Erosion_and_Sedimentation.html?id=T14jy4AY10YC&redir_esc=y
- Lambin, E. F., and H. J. Geist. 2006. *Land-Use and Land-Cover Change. Local Processes and Global Impacts*. edited by S. B. Heidelberg. Heidelberg (Germany).
- Le Maitre, D. C., I. M. Kotzee, and P. J. O'Farrell. 2014. Impacts of land-cover change on the water flow regulation ecosystem service: Invasive alien plants, fire and their policy implications. *Land Use Policy* 36 (0):171-181.
- Lepart, J., and M. Debussche. 1992. Human impact on landscape patterning: Mediterranean examples. In *Landscape Boundaries, Consequences for Biotic Diversity and Ecological Flows*, edited by A. J. Handsen and F. di Castri. New York: Springer, 76-106.
- Lillesand, T. M., R. W. Kiefer, and J. W. Chipman. 2008. *Remote Sensing and Image Interpretation*: John Wiley & Sons
- Lozano, F. J., S. Suarez-Seoane, M. Kelly, and E. Luis. 2008. A multi-scale approach for modeling fire occurrence probability using satellite data and classification trees: A case study in a mountainous Mediterranean region. *Remote Sensing of Environment* 112 (3):708-719.
- Martínez, J. E. 2000. Paisajes rurales cambiantes: la amenaza del abandono sobre los espacios montañosos de agricultura tradicional mediterránea. Aplicación del SIG en el estudio de los cambios, en los usos del suelo, en el municipio alicantino de Vall de Gallinera (1956-1998), Dpto. de Ecología. Facultad de Ciencias. Universidad de Alicante, Universidad de Santiago de Compostela, Alicante.
- Mouillot, F., S. Rambal, and R. Joffre. 2002. Simulating climate change impacts on fire frequency and vegetation dynamics in a Mediterranean-type ecosystem. *Global Change Biology* 8:423-437.
- Myers, N., R. A. Mittermeier, C. G. Mittermeier, G. A. B. da Fonseca, and J. Kent. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403 (6772):853-858.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River Flow Forecasting Through Conceptual Models Part I-a Discussion of Principles*. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Ometo, H. B., L. A. Martinelli, M. V. Ballester, A. Gessner, A. V. Krusche, R. J. Victoria, and M. Williams. 2000. Effects of land use on water chemistry and macroinvertebrates in

- two streams of the Piracicaba river basin, south-east Brazil. *Freshwater Biology* 44 (2):327-337.
- Peña, J. 2001. Análisis de los cambios de usos del suelo (1946-1999) en una cuenca semiárida (Agost, Alicante). Efectos sobre la estructura del paisaje y los balances hídricos. Tesis de licenciatura, Universidad de Alicante.
- Pickett, S. T. A. y. P. S. W. E. 1985. *The Ecology of Natural Disturbance*. edited by A. Press. New York, USA.
- Pueyo, Y., and S. Beguería. 2007. Modelling the rate of secondary succession after farmland abandonment in a Mediterranean mountain area. *Landscape and Urban Planning* 83 (4):245-254.
- Rishel, G. B., Lynch, J. A., Corbett, E. S. (1981). Seasonal stream temperature changes following forest harvesting. *Journal of Environmental Quality* 11(1): 112-116.
- Ritson, C., and D. R. Harvey. 1997. *The Common Agricultural Policy*. 2nd edition. edited by C. International. Wallingford.
- Robinson, R. B., M. S. Wood, J. L. Smoot, and S. E. Moore. 2004. Parametric modeling of water quality and sampling strategy in a high-altitude appalachian stream. *Journal of Hydrology* 287 (1-4):62-73.
- Rogan, J., J. Franklin, and D. A. Roberts. 2002. A comparison of methods for monitoring multitemporal vegetation change using Thematic Mapper imagery. *Remote Sensing of Environment* 80 (1):143-156.
- Sala, O. E., F. S. Chapin, III, J. J. Armesto, E. Berlow, J. Bloomfield, R. Dirzo, E. Huber-Sanwald, L. F. Huenneke, R. B. Jackson, A. Kinzig, R. Leemans, D. M. Lodge, H. A. Mooney, M. Oesterheld, N. L. Poff, M. T. Sykes, B. H. Walker, M. Walker, and D. H. Wall. 2000. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science* 287 (5459):1770-1774.
- Sancho Comins, J., J. Bosque Sendra, and F. Moreno Sanz. 1993. Crisis and permanence of the traditional Mediterranean landscape in the central region of Spain. *Landscape and Urban Planning* 23 (3-4):155-166.
- Tabor, K., & Williams, J. W. (2010). Globally downscaled climate projections for assessing the conservation impacts of climate change. *Ecological Applications*, 20(2), 554-565. <https://doi.org/10.1890/09-0173.1>
- Tebaldi, C., & Knutti, R. (2007). The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections. *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 365(1857), 2053-2075. <https://doi.org/10.1098/rsta.2007.2076>
- Teegavarapu, R. S. V, & Chandramouli, V. (2005). Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records. *Journal of Hydrology*, 312(1-4), 191-206. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.02.015>
- Tóth, B., Weynants, M., Pásztor, L., & Hengl, T. (2017). 3D soil hydraulic database of Europe at 250 m resolution. *Hydrological Processes*, 31(14), 2662-2666. <https://doi.org/10.1002/hyp.11203>

- Turner, B. L., and W. B. Meyer. 1991. Land use and land cover in global environmental change: Considerations for study. *International Social Science Journal* 130:669-679.
- Valladares, F. 2004. El bosque mediterráneo, un sistema antropizado y cambiante. In *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*, edited by F. V. (Eds.). Madrid: Organismo Autónomo de parques Nacionales (Ministerio de Medio Ambiente 13-26.
- Vallecillo, S. 2009. Los cambios en el paisaje y su efecto sobre la distribución de las especies: modelización y aplicación a la conservación de las aves de hábitats abiertos en paisajes mediterráneos, Centre Tecnològic Forestal de Catalunya, Universidad de Lleida, Lleida, Spain.
- Vitousek, P. M., H. A. Mooney, J. Lubchenco, and J. M. Melillo. 1997. Human Domination of Earth's Ecosystems. *Science* 277 (5325):494-499.
- Wu, J., and D. Marceau. 2002. Modeling complex ecological systems: an introduction. *Ecological Modelling* 153 (1-2):1-6.
- Zavala, M. A., and T. V. Burkey. 1997. Application of ecological models to landscape planning: the case of the Mediterranean basin. *Landscape and Urban Planning* 38 (3-4):213-227.
- CEDEX. (2016). Anuario de aforos 2013-2014.
- Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. (1992). Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models. *Water Resources Research*, 28(4), 1015-1031.
- Engelund, F., & Hansen, E. (1967). A monograph on sediment transport in alluvial streams. Technical University of Denmark. Copenhagen: TEKNISKFORLAG. Retrieved from <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:81101b08-04b5-4082-9121-861949c336c9/>
- FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC. (2012). Harmonized World Soil Database (version 1.2). Rome, Laxenburg.
- Graham, L. P., Andréasson, J., & Carlsson, B. (2007). Assessing climate change impacts on hydrology from an ensemble of regional climate models, model scales and linking methods - A case study on the Lule River basin. *Climatic Change*, 81(SUPPL. 1), 293-307. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9215-2>
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1-2), 80-91. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2009.08.003>
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96-99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G. B. M., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M., Blagotić, A., ... Kempen, B. (2017). SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *Plos One*, 12(2), e0169748. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>

- Holliday, C. P., Rasmussen, T. C., & Miller, W. P. (2003). Establishing the Relationship Between Turbidity and Total Suspended Sediment Concentration. 2003 Georgia Water Resources Conference, 1–3.
- IIAMA. (2018). Descripción del modelo conceptual distribuido de simulación hidrológica TETIS v.9.0. Valencia.
- Julien, P. Y. (1998). Erosion and sedimentation. Cambridge University Press. Retrieved from https://books.google.es/books/about/Erosion_and_Sedimentation.html?id=T14jy4AY10YC&redir_esc=y
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River Flow Forecasting Through Conceptual Models Part I-a Discussion of Principles*. *Journal of Hydrology*, 10, 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Renard, K. G., Laflen, J. M., Foster, G. R., & McCool, D. K. (1994). The Revised Universal Soil Loss Equation. In *Soil Erosion Research Methods* (2nd ed., p. 352). New York: Routledge. <https://doi.org/10.1201/9780203739358-5>
- Tabor, K., & Williams, J. W. (2010). Globally downscaled climate projections for assessing the conservation impacts of climate change. *Ecological Applications*, 20(2), 554–565. <https://doi.org/10.1890/09-0173.1>
- Tebaldi, C., & Knutti, R. (2007). The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections. *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 365(1857), 2053–2075. <https://doi.org/10.1098/rsta.2007.2076>
- Teegavarapu, R. S. V., & Chandramouli, V. (2005). Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records. *Journal of Hydrology*, 312(1–4), 191–206. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.02.015>
- Tóth, B., Weynants, M., Pásztor, L., & Hengl, T. (2017). 3D soil hydraulic database of Europe at 250 m resolution. *Hydrological Processes*, 31(14), 2662–2666. <https://doi.org/10.1002/hyp.11203>
- Zhang, S., and X. X. Lu. 2009. Hydrological responses to precipitation variation and diverse human activities in a mountainous tributary of the lower Xijiang, China. *CATENA* 77 (2):130-



ANEJO I



ANEJO I. INDICADORES DE CUMPLIMIENTO Y FUENTES DE VERIFICACIÓN

Con el objetivo de facilitar el análisis del cumplimiento del proyecto, a continuación se recogen o referencian los indicadores de cumplimiento de objetivos y las fuentes de verificación de resultados recogidas en el marco lógico.

OE1

Porcentaje de cambio de usos y ocupación del suelo entre el estado actual y el escenario futuro de cambio climático (BUV-50 años) en las 3 zonas de montaña.

PPNN	Periodo	Conservación		Restauración	
		Persistencia del bosque	Colonización de coníferas	Sucesión de matorral	Sucesión de pastizal
Picos de Europa	2018-2050	60%	0.19%	35.89%	3.88%
Guadarrama	2018-2050	44%	3.91%	4.24%	47.74%
Sierra Nevada	2018-2050	86.74%	2.87%	9.83%	0.53%

Cambio en indicadores estructurales para la valoración de la estructura del paisaje en cada una de las 3 zonas, comparando la situación actual con el escenario futuro de cambio climático (BUV-50 años): superficie en hectáreas de las transiciones entre dos unidades fisionómicas con el paso al escenario BUV-50 años.

Cambio de unidad fisionómica	Picos de Europa	Sierra de Guadarrama	Sierra Nevada
Mantenimiento de la frondosa	49325.85	13712.76	10639.53
Frondosa a conífera	77.49	710.01	2608.02
Frondosa a matorral	17221.14	1140.03	3683.52
Frondosa a pastizal	5942.97	3279.96	130.5
Frondosa a agrícola	4.5	41.76	1644.21
Frondosa a desnudo	11.7	11.97	156.6
Frondosa a antrópico	514.35	411.93	6.84
Conífera a frondosa	834.39	1217.52	4076.01
Mantenimiento de la conífera	75.96	48416.85	23514.48
Conífera a matorral	775.44	3848.85	2856.15
Conífera a pastizal	42.93	1318.95	126.54
Conífera a agrícola	0	11.88	78.39
Conífera a desnudo	0	117.99	173.61
Conífera a antrópico	14.49	572.49	0.18
Matorral a frondosa	6939	1321.11	17254.98
Matorral a conífera	12.69	4570.92	12942.9
Mantenimiento del matorral	43226.46	27379.08	195609.33
Matorral a pastizal	1874.34	4971.6	11082.24
Matorral a agrícola	0.27	143.37	22341.87
Matorral a desnudo	1094.13	2059.2	5840.1
Matorral a urbano	128.88	1092.33	377.46
Pastizal a frondosa	5776.02	14846.49	287.55

Cambio de unidad fisionómica	Picos de Europa	Sierra de Guadarrama	Sierra Nevada
Pastizal a conífera	14.13	1372.68	11.25
Pastizal a matorral	7823.7	13675.68	5212.26
Mantenimiento del pastizal	11873.79	108210.24	1017.36
Pastizal a agrícola	5.76	6647.31	4273.11
Pastizal a desnudo	22.86	1014.93	967.77
Pastizal a antrópico	799.02	2114.19	159.03

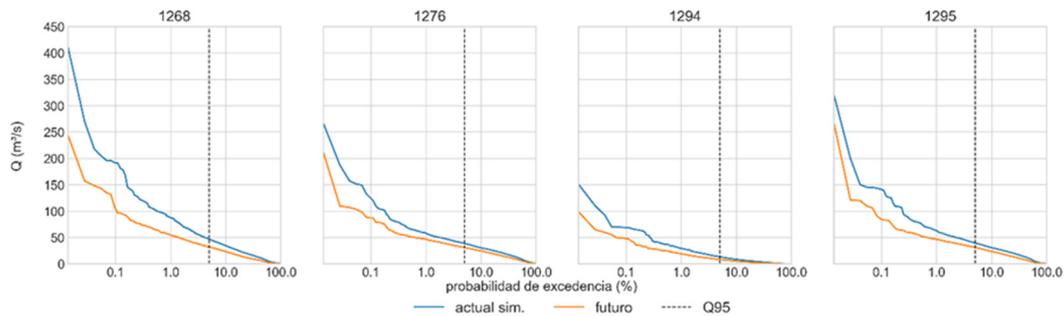
OE2

Cambio en indicadores hidrológicos y de erosión para la valoración del funcionamiento hidrológico y procesos asociados en cada una de las 3 zonas, comparando la situación actual con el escenario futuro de cambio climático (BUV-50 años). 1- Variación en las aportaciones de cada uno de los aforos de calibración entre ambos escenarios. 2- Probabilidad de excedencia de un caudal Q para Picos de Europa. 3- Probabilidad de excedencia de un caudal Q para Sierra de Guadarrama. 4- Indicadores de erosión presente y % de cambio para Picos de Europa y Sierra de Guadarrama. (Al haber utilizado diferente modelo hidrológico en Sierra Nevada no se calcularon estos dos últimos indicadores).

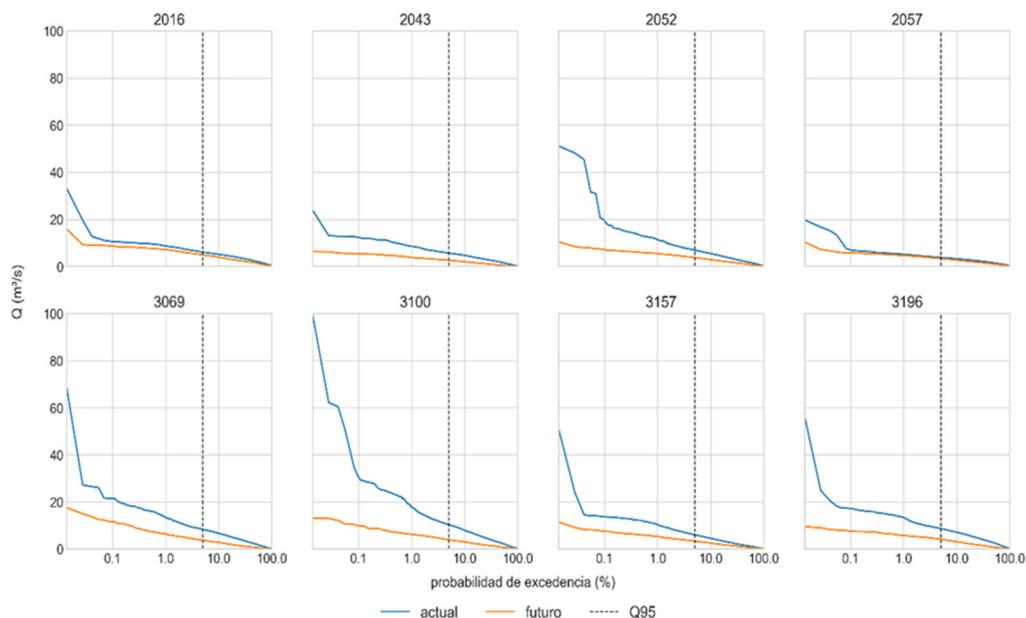
1

Picos de Europa	1268	1276	1294	1295					Media
	-37.8%	-26.0%	-40.0%	-31.8%					-33.1%
Sierra de Guadarrama	2016	2043	2052	2057	3069	3100	3157	3196	Media
	-31.5%	-62.9%	-50.6%	-25.8%	-62.0%	-64.6%	-46.4%	-62.0%	-50.3%
Sierra Nevada	110	120	123	127					Media
	-92,2%	-92,2%	-88,4%	-96,0%					92,2%

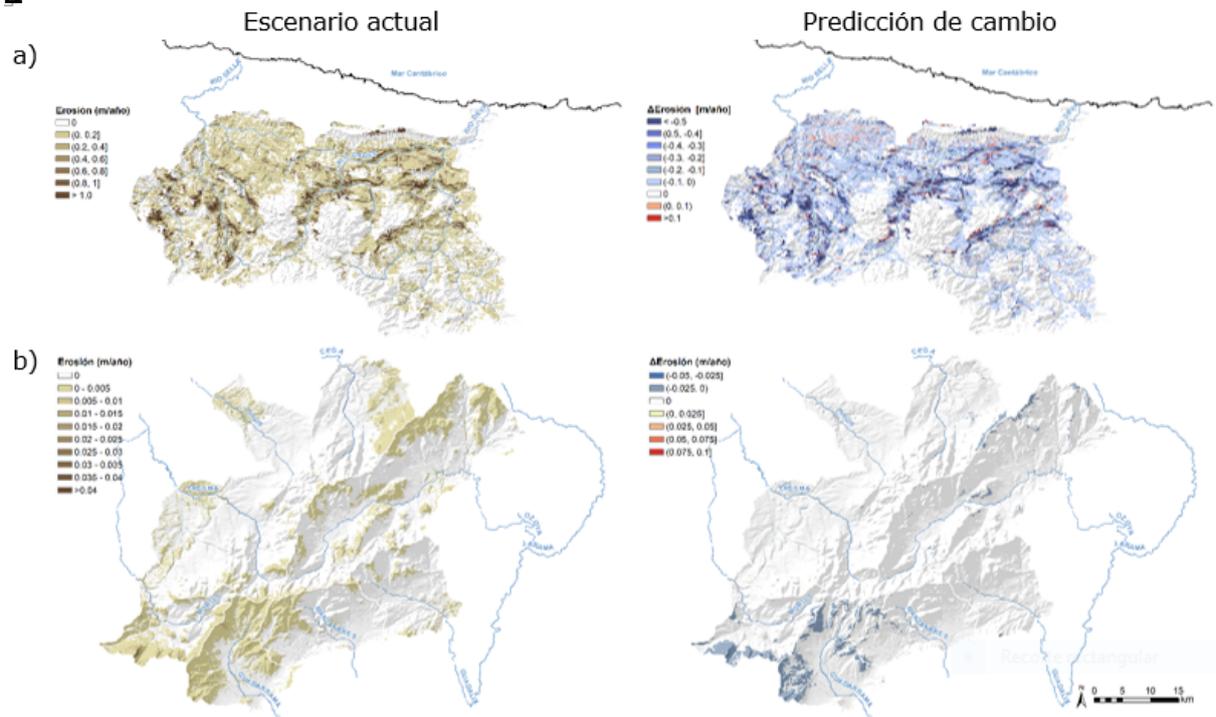
2



3



4



OE3
Reuniones con gestores de los 3 PPNN planteadas en A3 y número de participantes.

19/06/2018 - Centro de Investigación del P.N. de la Sierra de Guadarrama (Rascafría): 5 participantes.

22/06/2018 - Oficina central del P.N. de los Picos de Europa (Oviedo): 5 participantes.

26/06/2018 - Observatorio del Cambio Global de Sierra Nevada: 20 participantes.

Superficie (en ha.) de cada una de las 3 zonas de montaña seleccionadas, que habrán sido modeladas como parte de la red de infraestructura verde diseñada en A3 y variación de métricas específicas para la valoración de la estructura del paisaje en cada una de las 3 zonas de montaña seleccionadas, comparando el escenario futuro de cambio climático sin red de infraestructura verde (BUV-50 años) con el escenario futuro de cambio climático con red de infraestructura verde implementada (BUV-IV-50 años).

Elementos de la red de Infraestructura Verde	Picos de Europa	Guadarrama	Sierra Nevada
Conservación de bosque	26%	5%	2%
Conservación de bosque + servicio	4%	0%	0%
Expansión forestal	17%	6%	5%
Expansión forestal + servicio	3%	0%	0%
Respuesta a servicio	7%	1%	1%
<i>Total área cubierta por la GIN</i>	57%	12%	8%
	(104409.37ha)	(30883.30ha)	(32814.09ha)
<i>Área no cubierta por la GIN</i>	43%	88%	92%

Diferencia entre los indicadores hidrológicos y de erosión para la valoración del funcionamiento hidrológico y procesos asociados, comparando el escenario futuro de cambio climático sin red de infraestructura verde (BUV-50 años) con el escenario futuro de cambio climático con red de infraestructura verde implementada (BUV-IV-50 años).

Aunque en el proyecto original se recogía un tercer escenario de modelado hidrológico en las 3 zonas de montaña seleccionadas (tras el diseño de la red de IV), en vista de los resultados obtenidos no se ha considerado necesario llevarlo a cabo debido a las pocas diferencias en la hidrología que existirían entre el escenario futuro sin IV y el escenario futuro con IV. Al ser el cambio climático el principal driver de cambio hidrológico, las dinámicas asociadas al comportamiento hidrológico de las cuencas de las 3 zonas de montaña seleccionadas (especialmente las que se encuentran en dominio mediterráneo) estarán dirigidas de forma mayoritaria por este. Por tanto, la sola variación de la cobertura de vegetación en escalas pequeñas en relación al resto de la superficie de cuenca (el tipo de actuaciones consideradas en el diseño de una IV) no producirá un cambio relevante en su funcionamiento hidrológico. Este hecho se ve además acrecentado por una limitación que creemos adolecen los modelos hidrológicos actuales: no consiguen capturar correctamente la interacción entre la vegetación y el horizonte orgánico superior del suelo

(H), simplificando el efecto de la vegetación a una mayor pérdida de agua del sistema por efecto del aumento de la evapotranspiración.

Número de visitas a la página web del proyecto.

386 visitas, con una media de 3,5 páginas servidas por visita.

Número de publicaciones divulgativas y científicas.

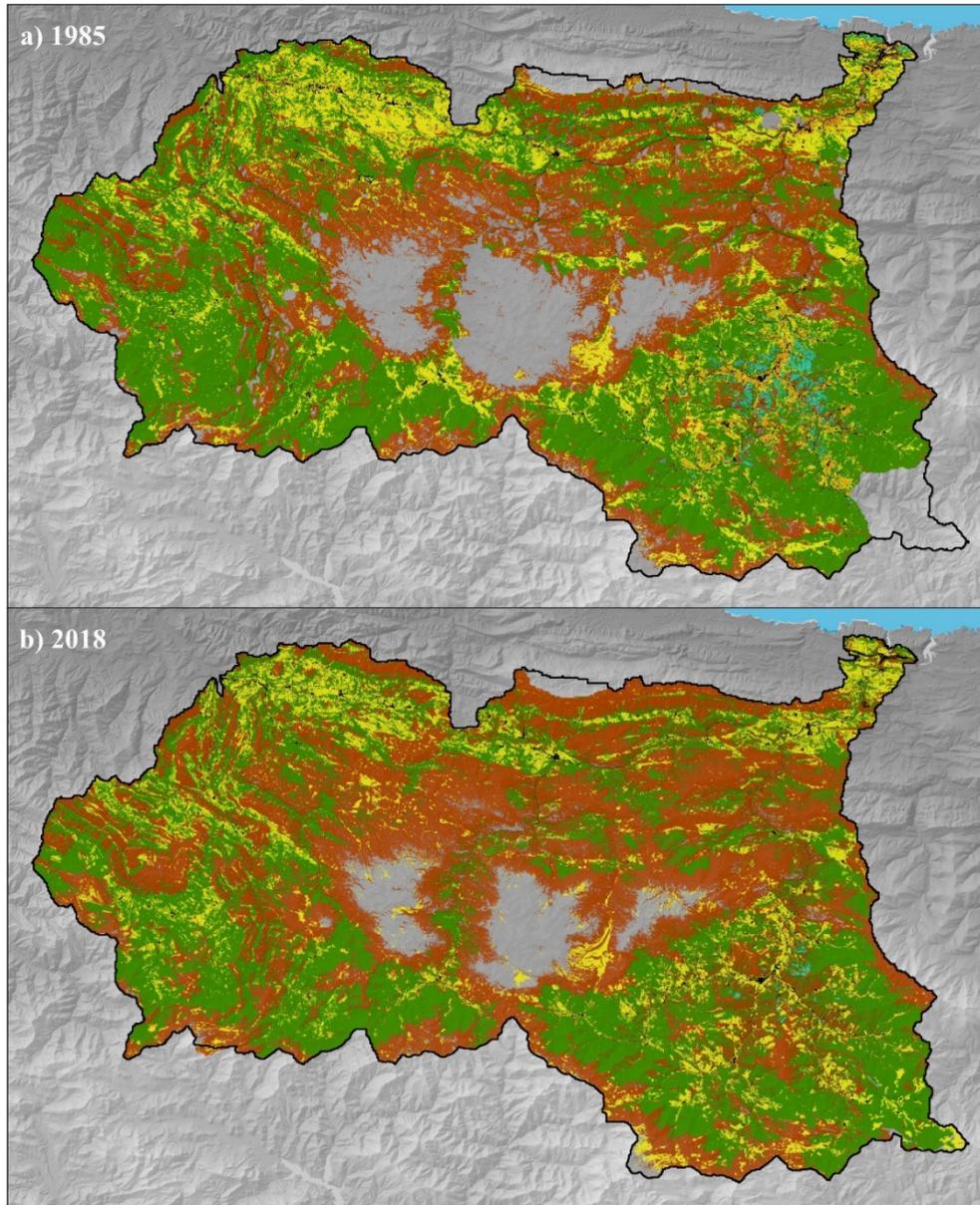
Actuales:0. Se espera acudir en el próximo año (2019) al congreso SIBECOL con los resultados del proyecto (abstract ya enviado), así como obtener con ellos dos publicaciones en revista indexada del primer cuartil.

Número de noticias en redes sociales y medios de comunicación convencionales donde se muestren los avances y resultados del proyecto.

13 (tras la entrega del informe el proyecto seguirá activo en las redes sociales hasta que se terminen de publicar los resultados del mismo).

FV 1.1

6 mapas de caracterización de la estructura del paisaje. Cada una de las 3 zonas de montaña seleccionadas presentarán 2 mapas: 1 mapa de unidades fisionómicas para la situación actual y 1 mapa de unidades fisionómicas para el escenario BAU-50 años. Estos se incluirán en el informe final del proyecto.

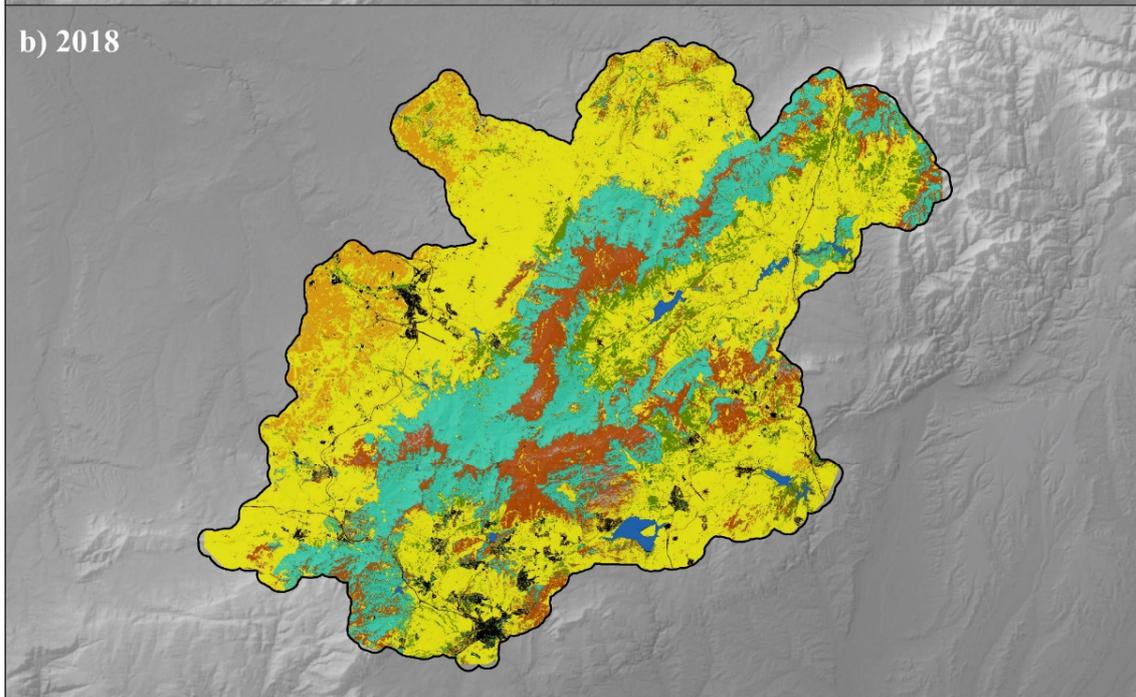
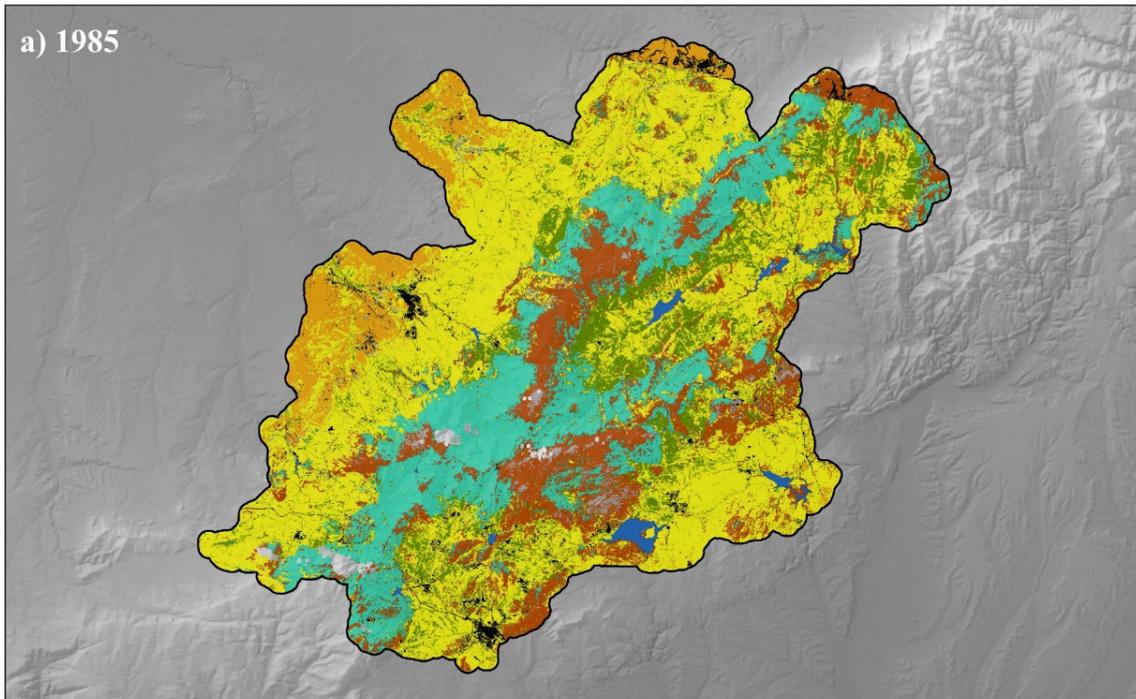


MAPAS DE OCUPACIÓN:

- | | |
|---|--|
|  Bosques |  Cultivos |
|  Repoblaciones |  Roquedos |
|  Matorrales |  Urbano |
|  Pastizales |  Agua |



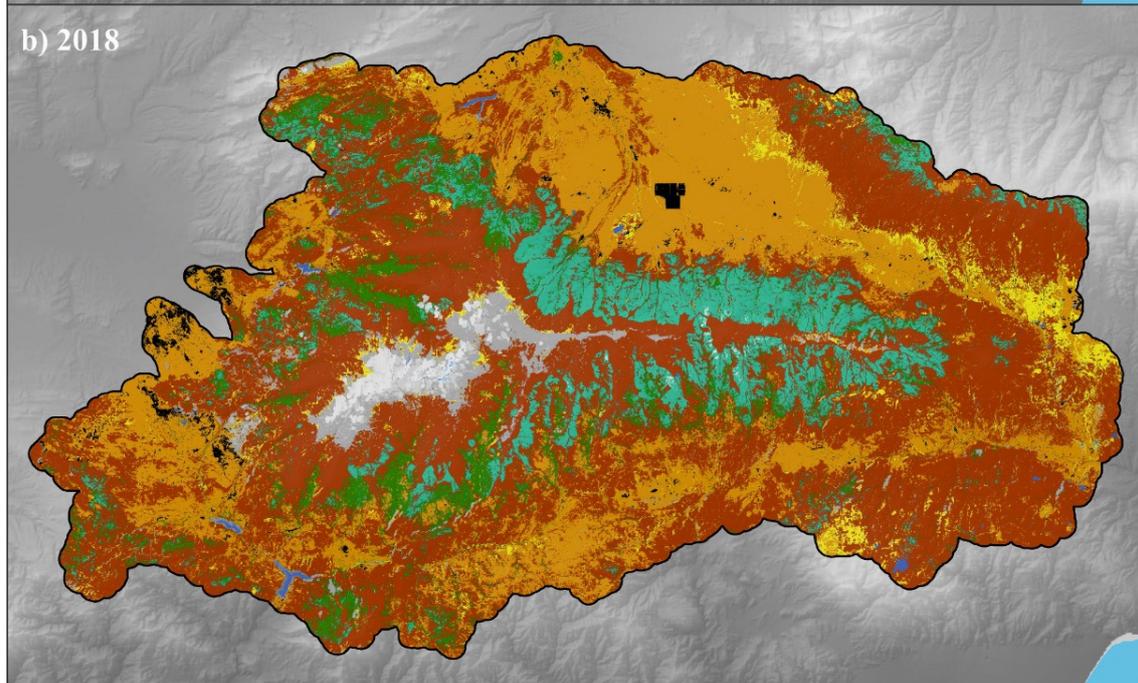
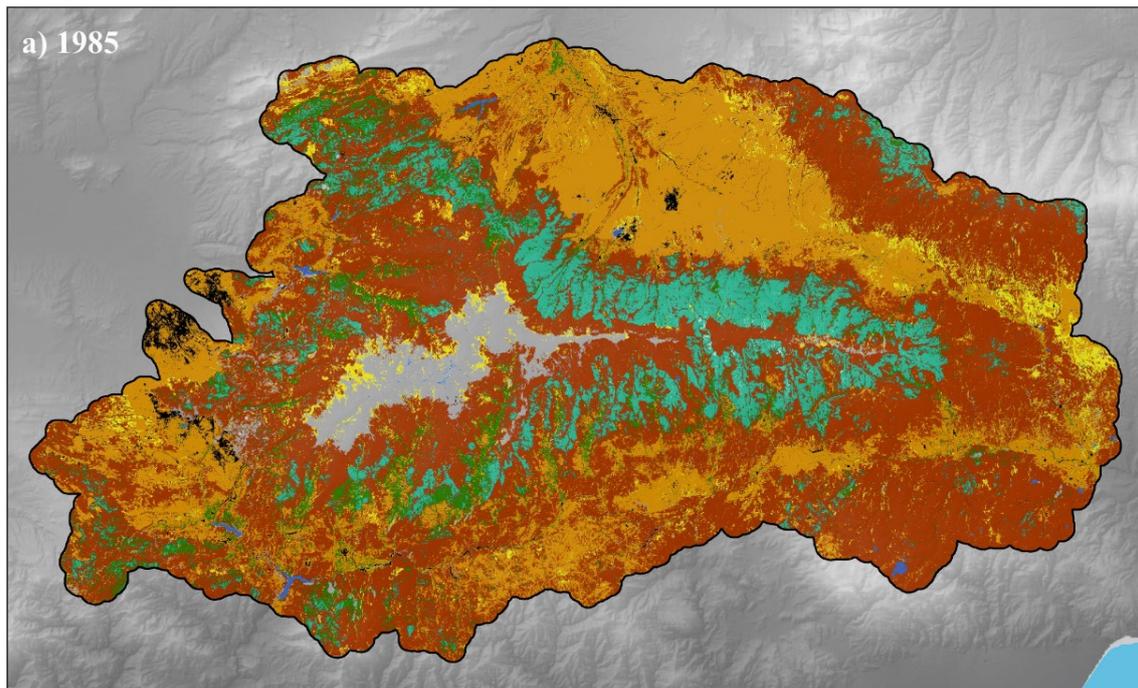
PICOS DE EUROPA



MAPAS DE OCUPACIÓN:

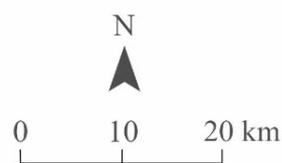
- | | |
|---|--|
|  Bosques |  Cultivos |
|  Repoblaciones |  Roquedos |
|  Matorrales |  Urbano |
|  Pastizales |  Agua |





MAPAS DE OCUPACIÓN:

- | | |
|---|--|
|  Bosques |  Cultivos |
|  Repoblaciones |  Roquedos |
|  Matorrales |  Urbano |
|  Pastizales |  Agua |



Sª NEVADA

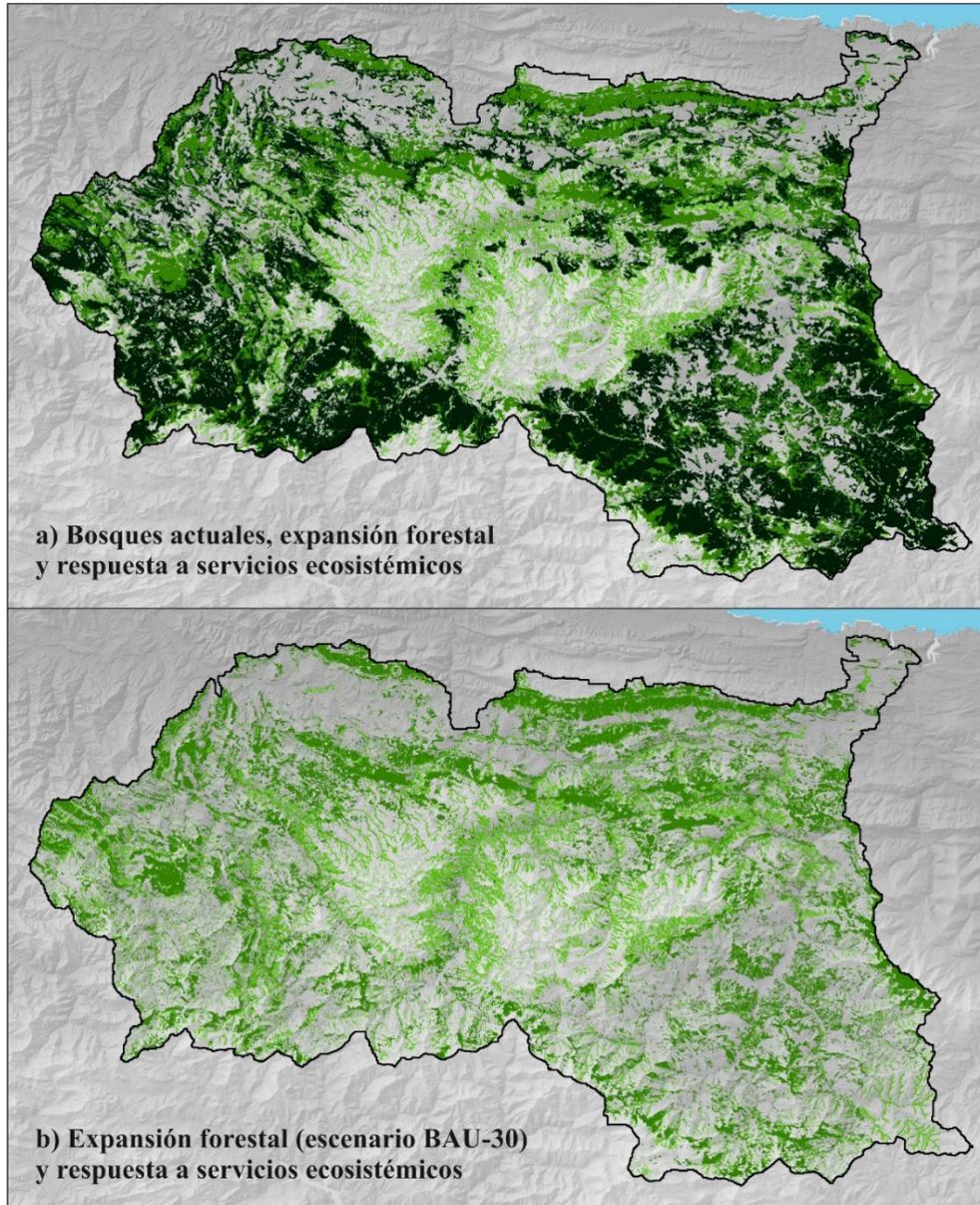
FV 1.2

Resultados de la evolución de la estructura del paisaje y su dinámica de cambio, incluidos en el informe final del proyecto.

Apartado 4.2 del Informe final del proyecto.

FV 1.3

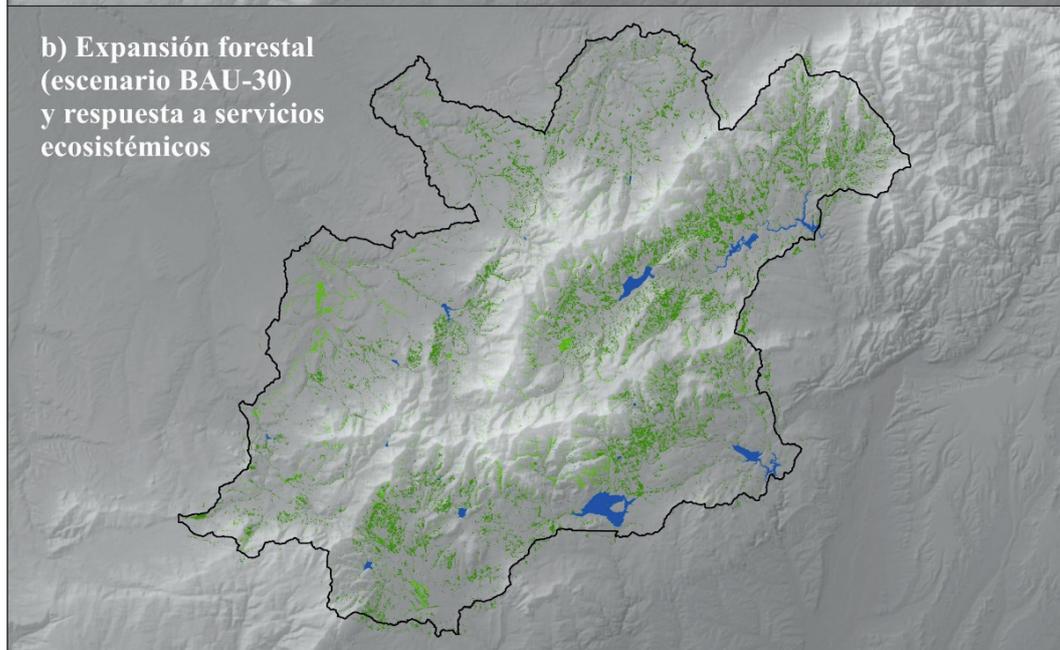
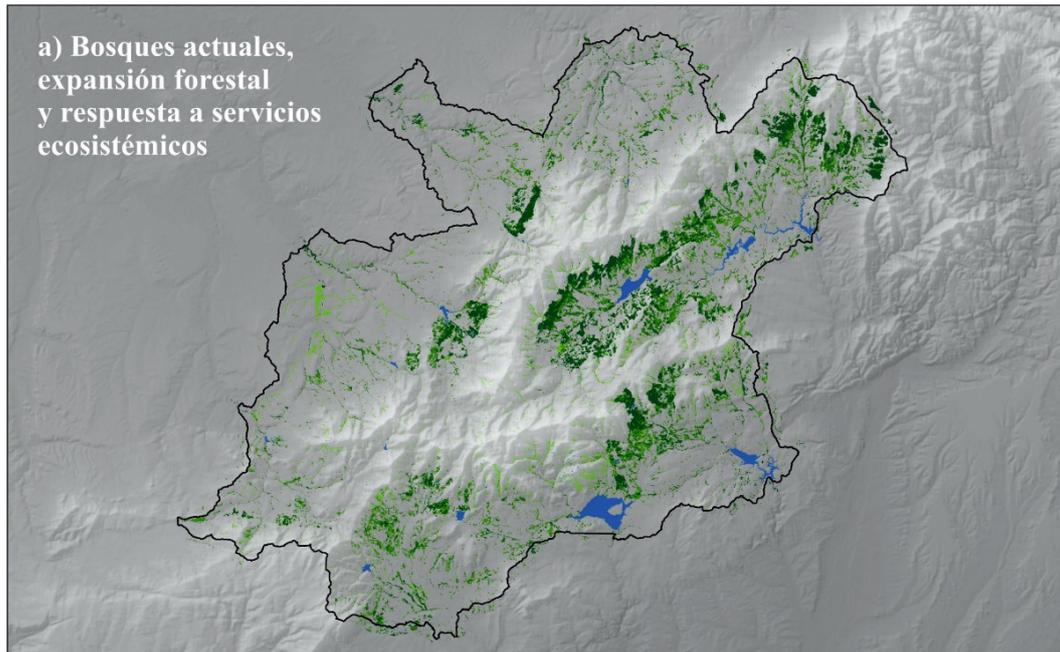
3 mapas de caracterización de la estructura del paisaje. Cada una de las 3 zonas de montaña seleccionadas presentará 1 mapa de unidades fisionómicas para el escenario BAU-IV-50 años. Estos se incluirán en el informe final del proyecto.



ELEMENTOS DE LA RED:

- Bosques existentes en la actualidad (año 2018)
- Expansión predicha de masas forestales (BAU-30)
- Repoblaciones forestales (respuesta a servicios)

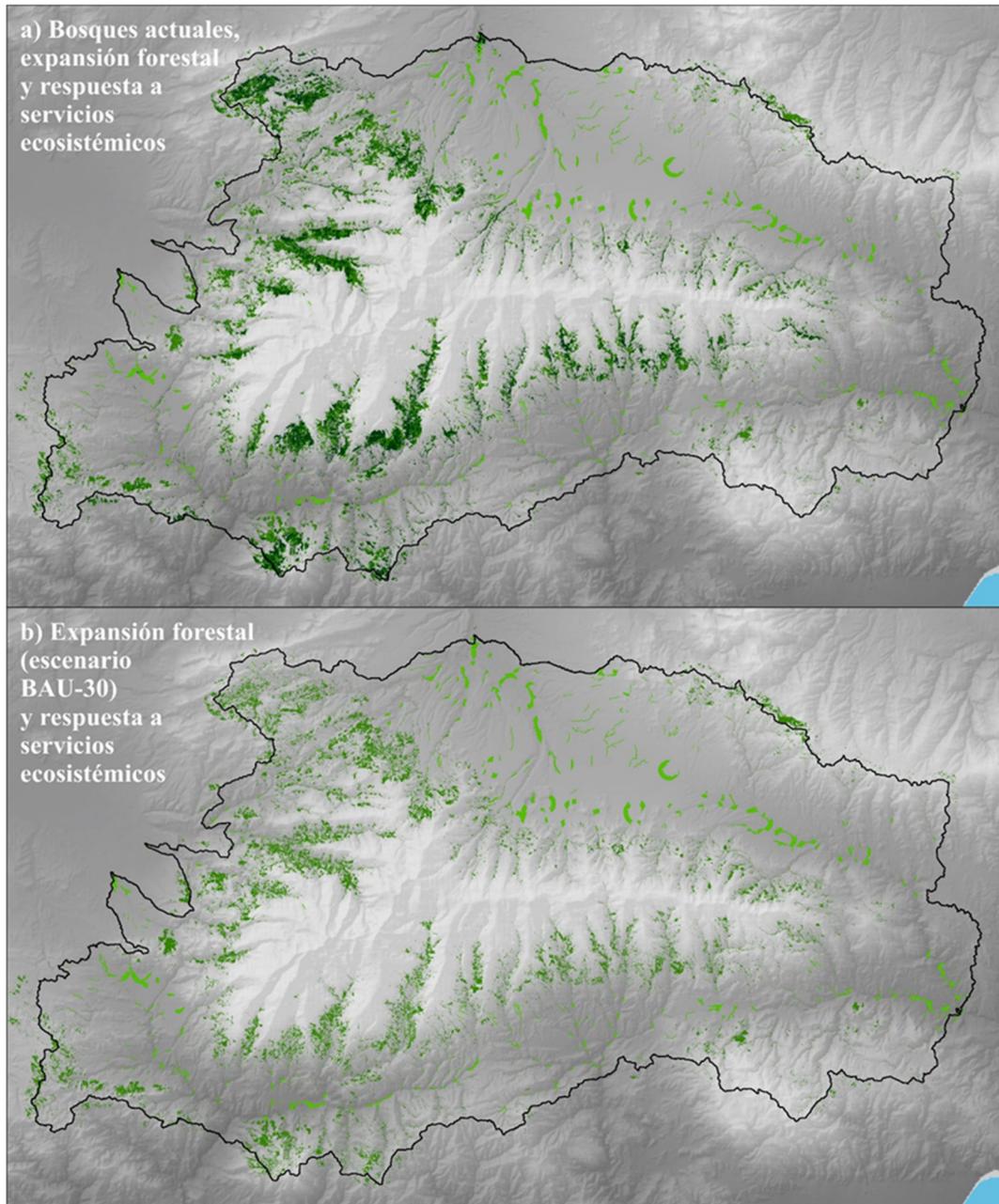




ELEMENTOS DE LA RED:

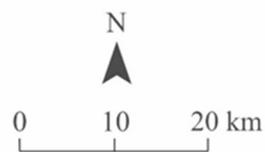
- Bosques existentes en la actualidad (año 2018)
- Expansión predicha de masas forestales (BAU-30)
- Repoblaciones forestales (respuesta a servicios)





ELEMENTOS DE LA RED:

-  Bosques existentes en la actualidad (año 2018)
-  Expansión predicha de masas forestales (BAU-30)
-  Repoblaciones forestales (respuesta a servicios)



FV 2.1

Parametrización, calibración y resultados del modelado hidrológico para los escenarios actual y BAU-50 años en cada una de las 3 zonas de montaña seleccionadas. Estos se incluirán en el informe final del proyecto.

Apartado 5 del Informe final del proyecto

FV 2.2

Parametrización, calibración y resultados del modelado hidrológico para el escenario BAU-IV-50 años en cada una de las 3 zonas de montaña seleccionadas. Estos se incluirán en el informe final del proyecto.

Aunque en el proyecto original se recogía un tercer escenario de modelado hidrológico en las 3 zonas de montaña seleccionadas (tras el diseño de la red de IV), en vista de los resultados obtenidos no se ha considerado necesario llevarlo a cabo debido a las pocas diferencias en la hidrología que existirían entre el escenario futuro sin IV y el escenario futuro con IV. Al ser el cambio climático el principal driver de cambio hidrológico, las dinámicas asociadas al comportamiento hidrológico de las cuencas de las 3 zonas de montaña seleccionadas (especialmente las que se encuentran en dominio mediterráneo) estarán dirigidas de forma mayoritaria por este. Por tanto, la sola variación de la cobertura de vegetación en escalas pequeñas en relación al resto de la superficie de cuenca (el tipo de actuaciones consideradas en el diseño de una IV) no producirá un cambio relevante en su funcionamiento hidrológico. Este hecho se ve además acrecentado por una limitación que creemos adolecen los modelos hidrológicos actuales: no consiguen capturar correctamente la interacción entre la vegetación y el horizonte orgánico superior del suelo (H), simplificando el efecto de la vegetación a una mayor pérdida de agua del sistema por efecto del aumento de la evapotranspiración.

FV 3.1

Hojas de firmas de los asistentes.

Proyecto IVERCAM

Reuniones con gestores de Parques Nacionales

Parque Nacional de Picos de Europa

Fecha: 22-VI-2018

Asistente	Cargo	Firma
D. Rodrigo Suárez Robledano	Co-Director del Parque Nacional de Picos de Europa - Asturias	
D. Ángel Serdio Cosío	Co-Director del Parque Nacional de Picos de Europa - Cantabria	
D. Mariano Torre Antón	Co-Director del Parque Nacional de Picos de Europa - Castilla y León	
José Barquín Ortiz	Profesor Titular de la Universidad de Cantabria	
Ignacio Pérez Silos	Investigador pre-doctoral de la Universidad de Cantabria	

Reunión Proyecto IVERCAM

Parque Nacional Sierra de Guadarrama

Fecha: 19/06/2018

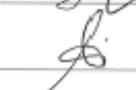
Asistente	Cargo	Firma
JOSÉ BARQUÍN ORTIZ	Profesor Universidad de Cantabria	
IGNACIO GRANADOS MARTINEZ	TECNICO CENTRO DE INVESTIGACION, SEGUIMIENTO Y EVALUACION	
ANGEL RUBIO ROMERO	TECNICO CENTRO INVEST, SEGUIMIENTO Y EVALUACION	
Ignacio Pérez Silos	Investigador IH Cantabria (Universidad Cantabria)	
JUAN A. VIELVA JUE,	DIRECTOR COMANDO DE INVESTIGACION DEL PIN SIERRA GUADARRAMA	

Proyecto IVERCAM

Reuniones con gestores de Parques Nacionales

Parque Nacional de Sierra Nevada

Fecha: 26-VI-2018

Asistente	Cargo	Firma
Blanca Ramos Abasada	Técnico Área de Conservación	
Juan Reyes Moreno	Coordinador Gestión Medio Ambiente	
PAULINA GATEGA PARRA	APD ÁREA CALENTAMIENTO	
Esperanza Jimenez Shaw	Asesoría Técnica ENSN	
Rut Aspizua Gurtión	Eg. Coordinación Técnica Life Adaptamed	
F. Javier Novillo- Gómez-Mena	ASESOR TÉCNICO E.N. SIERRA NEVADA	
JOSÉ MIGUEL MUÑOZ DE PABO	TÉCNICO Agenc. Mat. Amb y Agua	
IGNACIO HERNÁNDEZ	CONSERVADOR PARQUE NACIONAL Y NATURAL.	
JAVIER CABREJO PARRA	UNIVERSIDAD DE ALCALALÁ	
Javier Herrero	UNIVERSIDAD ISTA/CEAMA	
MARÍA JOSÉ PÉREZ PARRÓN	INVESTIGADORA UNIVERSIDAD GRANADA. GRUPO DINÁMICA FLUVIAL E HIDROLOGÍA	

DOMINGO ALCARAZ SEGURA	PROFESOR CONTRATADO DOCTOR. UNIV. DE GRANADA	
Ricardo Moreno Llorca	Investigador CEAMA Observatorio CG	
MIGUEL GALIANA GARCÍA	TÉCNICO AGENCIA MEDIO AMBIENTE Y AGUA	
Ana Silio Calzada	IH-Cantabria / UNIV. DE CANTABRIA	

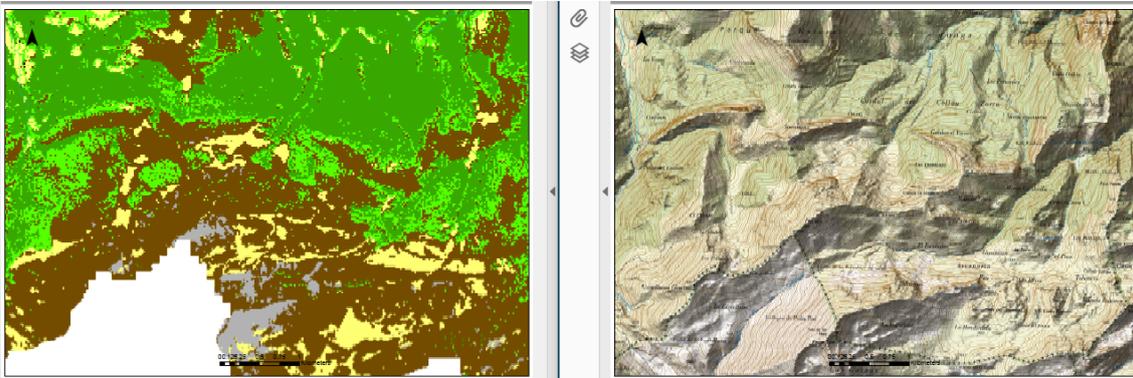
Facturas de gastos de desplazamiento y manutención.

Ver en documentación económica.

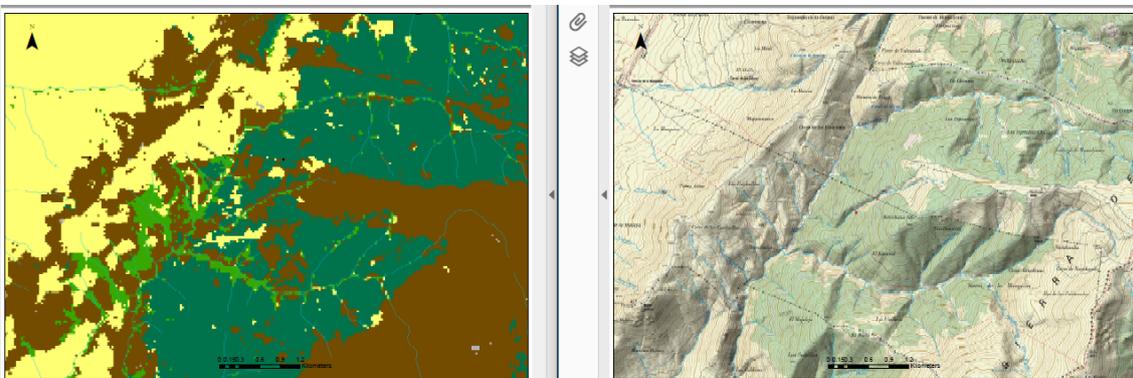
FV 3.2

Mapa-boceto con la red de infraestructura verde para cada una de las 3 zonas de montaña seleccionadas en el que se incluyan las áreas y tipologías de actuación (p.ej. desarrollo del bosque de ribera, inserción de setos vegetados, creación de humedales). Se exponen a continuación unos ejemplos del material que se generó para las reuniones con los gestores de los Parques, indicando diferentes zonas con potencial para ser integradas en la infraestructura verde. Dichos mapas-bocetos supusieron la base de trabajo durante dichas jornadas. 1- Rewilding en Picos de Europa, 2- vaguadas como elementos de expansión de la frondosa en manchas de coníferas (Sierra de Guadarrama) y 3- mismo caso que el anterior en Sierra Nevada.

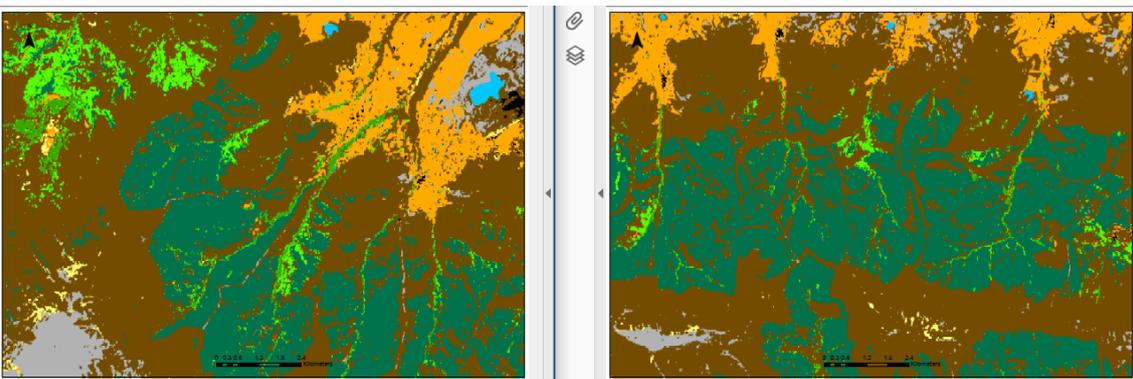
1



2



3



FV 3.3

Informe integrado en el informe final del proyecto en el que se resalten los resultados, propuestas y medidas más relevantes definidas en este apartado.

Apartado 6.3 del Informe final del proyecto.

FV 3.4

Existencia de logo del proyecto.



Dirección URL a la página web del proyecto.

<http://ivercam.ihcantabria.es>

1 informe de google analytics con las visitas a la página web.

386 visitas, con una media de 3,5 páginas servidas por visita.

1 copia de la información publicada en las redes sociales e informe de seguimiento en relación al proyecto IVERCAM.

Nota de prensa:

De acuerdo con la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (EM), Europa presenta los paisajes más alterados y fragmentados del mundo debido a su larga historia de urbanización, agricultura y ganadería, y a su alta densidad de redes de transporte ferroviario y por carretera. La degradación que han sufrido los ecosistemas acuáticos y terrestres europeos ha propiciado una dramática reducción de los servicios que nuestras sociedades pueden obtener de estos ecosistemas, así como una pérdida de su biodiversidad y una mayor vulnerabilidad frente a los efectos del cambio climático.

Para reducir esta tendencia, es necesario planificar y optimizar las actuaciones de restauración sobre el paisaje generando una red de infraestructuras verdes que permita maximizar la recuperación y conservación de los ecosistemas. Las redes de infraestructuras verdes constan de diferentes elementos con diferentes atributos y funciones (p.e. bosques de ribera, llanuras de inundación, bosques de ladera, setos, etc...). El diseño de una red de infraestructuras verdes debe observar la correcta interrelación entre los diferentes elementos del paisaje para garantizar la conservación de la biodiversidad, el buen funcionamiento de los ecosistemas y un beneficio a las comunidades locales (p.e., defensa frente a inundaciones, disponibilidad de agua, madera, alimentos). De esta manera, la iniciativa "Infraestructura Verde" de la Unión Europea (UE; 2013) ha sido diseñada para abordar este desafío, estableciendo un marco en el que llevar a cabo una gestión integral

del territorio basada en la conservación y restauración de una red de espacios destinada a la mejora de la biodiversidad y de los servicios ecosistémicos (calidad y disponibilidad de agua, control y mitigación de inundaciones, reducción de sedimentos, secuestro de carbono, etc...). A pesar de esta necesidad, el diseño de redes de infraestructura verde se encuentra todavía en las primeras etapas de su conceptualización y desarrollo. Existen, en la actualidad importantes vacíos técnicos que deben resolverse mediante técnicas de modelado que tengan en cuenta los efectos del cambio climático a medio y largo plazo.

Durante los últimos años, el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IHCantabria) ha estado investigando la influencia del territorio sobre la cantidad y calidad del agua en los ríos, los cuales podrían considerarse las venas del territorio. Estos trabajos han puesto de manifiesto la importancia de mantener en un buen estado de conservación los ecosistemas de la cuenca para garantizar el correcto funcionamiento de los ríos. Actualmente, IHCantabria ha resultado beneficiario de una ayuda por parte de la Fundación Biodiversidad, en la convocatoria para la realización de proyectos en materia de adaptación al cambio climático, para poner en marcha el proyecto IVERCAM "Desarrollo de una metodología para la implementación de Infraestructuras VERdes como medida de adaptación al CAMBIO climático en Zonas de Montaña de la Península Ibérica", el cual se desarrollará desde septiembre de 2017 a junio de 2018. El principal objetivo de IVERCAM será el de construir una metodología que facilite el diseño e implementación de redes de infraestructura verde en cuencas de montaña, trabajando concretamente en 3 áreas de gran interés socioeconómico y ambiental: el Parque Nacional de Picos de Europa, el Parque Nacional de Sierra de Guadarrama y el Parque Nacional de Sierra Nevada. Al final del proyecto se habrá diseñado una red de infraestructura verde para cada uno de los tres Parques Nacionales, evaluando en cada uno cómo de efectivas son estas medidas en materia de adaptación al cambio climático. El hecho de que estas tres áreas de montaña se encuentren en dominios climáticos y biogeográficos muy diferenciados (Cordillera Cantábrica, Sistema Central y Sistema Bético) permitirá explorar el efecto diferencial del cambio climático en cada sistema montañoso y cómo esto influiría en las soluciones adoptadas.

Los resultados más relevantes de este proyecto, con especial atención a la cartografía de infraestructura verde generada, se encontrarán a disposición del público en el portal web <http://ivercam.ihcantabria.es>. Con ello IVERCAM pretende dar visibilidad a este tipo de actuaciones que, por su influencia en la gestión y ordenación territorial, requieren de la participación e implicación de los diversos sectores de la sociedad.

Información en ResearchGate:

IVERCAM Project: Developing an approach to Implement Green Infrastructure networks as an adaptive measure against climate Change in Mountain areas of the Iberian Peninsula.

During the last decades, climate change and land use change (global change) have caused an unprecedented loss of biodiversity. The increase in forest fragmentation, the elimination of natural systems by anthropogenic infrastructures, the agricultural practices, as well as deliberately caused wildfires, have contributed to the generation of degraded landscape mosaics. These are formed by patches of isolated and non-interconnected natural habitat and their functional features have been modified, altering the species distribution and the flows of energy and matter that occur between different ecosystems. To reduce these impacts, restoration strategies must strategically target key watershed processes and

attributes in aquatic, riparian and upland environments but in ways that also support local communities. EU's "Green Infrastructure" initiative is designed to address this challenge, including as a linked network of restoration activities to enhance a wide range of ecosystem services

In this context, the IVERCAM project will develop a methodology to optimize the implementation of green infrastructure networks in mountain areas as climate change adaptation elements. Two key elements will be followed: the conservation of an adequate landscape structure and an improvement of the hydrological functioning of the catchment. IVERCAM will work in 3 Spanish mountain National Parks located in different mountain ranges: Picos de Europa (Cantabrian Mountains), Sierra de Guadarrama (Sistema Ibérico Mountains) and Sierra Nevada (Sistema Bético Mountains). This design will allow to explore the effects of climate change in three contrasting areas and, subsequently, the adoption of the most effective nature-based solutions depending on the environmental features.

IVERCAM will integrate different methods and disciplines such as remote sensing for the characterization of landscape structure, hydrological modelling and the prediction of climate change scenarios. In addition, IVERCAM will consensus with local agents the proposed solutions, so that the project can serve to guide future management plans in the chosen areas and in other mountain areas. Therefore, the ultimate goal of IVERCAM is not only to generate a cartography of green infrastructure networks for the study areas, but it pretends to develop a methodology that can be applicable to other mountain areas regardless of its climatic and biogeographic characteristics.

IVERCAM Project is supported by the Biodiversity Foundation, from the Spanish Ministry of Agriculture and Fishing, Nutrition and Environment.

Información en Twitter:

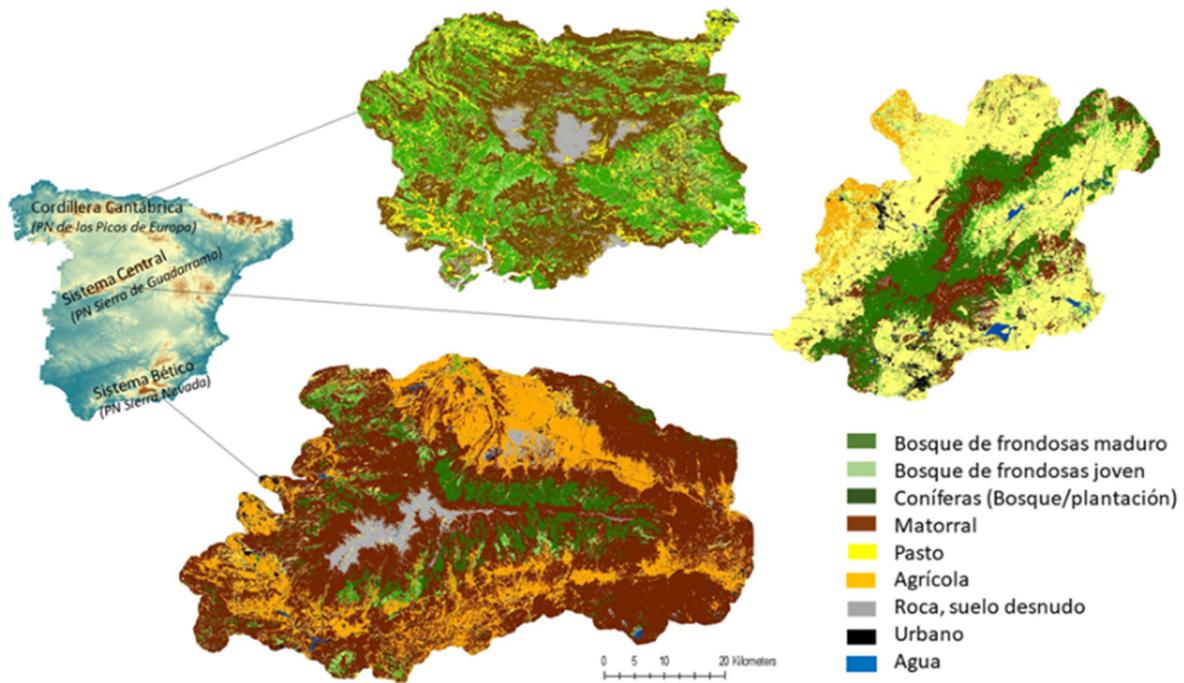
Presentamos el #proyectoIVERCAM, creación y análisis de medidas de #adaptacionCC en Picos de Europa, Sierra Nevada y @PN_Guadarrama, #CamboClimático.



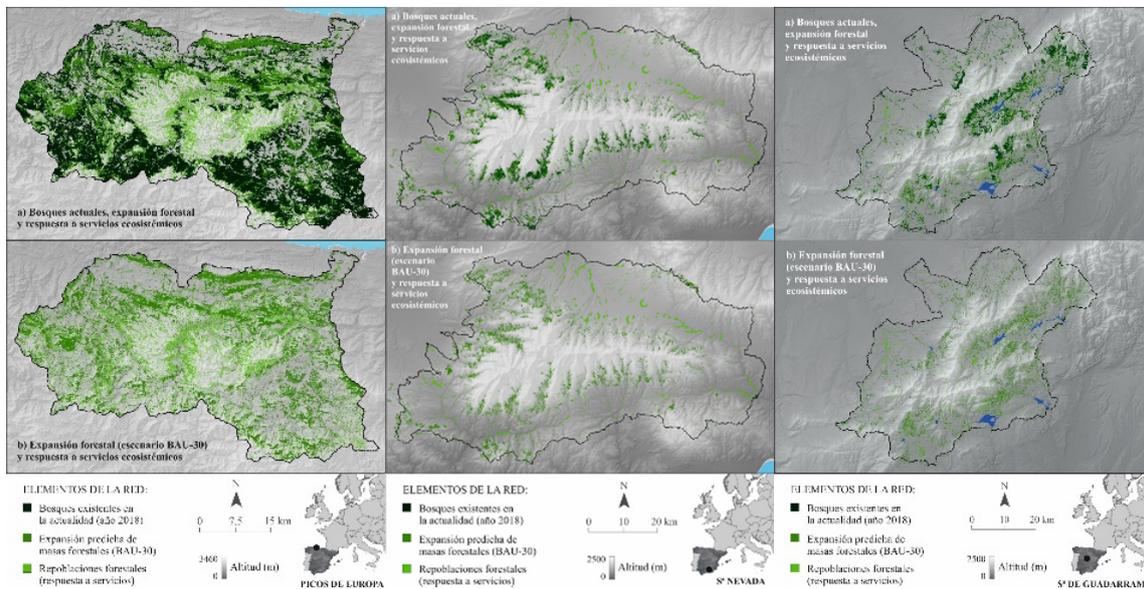
Preparados ya los mapas de vegetación y modelos hidrológicos de estos tres sistemas montañosos tan diferentes. Ahora, ia analizar su dinámica de cambios en los últimos 25 años para obtener el una proyección futura del paisaje que encontraremos en unos años!

DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE INFRAESTRUCTURAS VERDES
COMO MEDIDA DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN ZONAS DE MONTAÑA DE LA PENÍNSULA IBÉRICA (PROYECTO IVERCAM)

ANEJO I



En IVERCAM hemos diseñado una red de Infraestructura Verde para los PP.NN. de Picos de Europa, Sierra de Guadarrama y Sierra Nevada; basándonos en las dinámicas paisajísticas y climato-hidrológicas observadas, así como en la visión de gestores e investigadores de los propios Parques. Como veréis, las condiciones climáticas son las que más influyen en las decisiones tomadas para su diseño.



FV 3.5

Copia en pdf de todas las publicaciones asociadas a IVERCAM.

Se espera acudir en el próximo año (2019) al congreso SIBECOL con los resultados del proyecto (resumen ya enviado), así como obtener con ellos una publicación en revista indexada del primer cuartil.

Resumen enviado al congreso SIBECOL:

The main goal of this study has been designed a Green Infrastructure Network (GIN) for 3 Spanish mountain National Parks (Picos de Europa, Sierra de Guadarrama and Sierra Nevada) as global change adaptation elements. Two key elements will be followed: the conservation of an adequate landscape structure and the improvement of the hydrological functioning of the catchment. This design has allowed to explore the effects of global change in three contrasting areas and, subsequently, the adoption of the most effective nature-base solutions depending on the environmental features and their change. In each case study, current and future landscape structure was mapped using a methodology based on remote sensing. Both maps were an input for modelling hydrological functioning using a hydrological model and several geospatial analysis tools. Two climatic scenarios were modeled: current situation and a future projection under a Business as Usual scenario of Climate Change. Finally, a multicriteria analysis were applied to the generated information in order to optimize the design of the GIN. Furthermore, the proposed solutions were agreed with local agents, so it can serve to guide future management plans in the chosen areas. The results showed significant differences between the three National Parks. While in Picos de Europa a strong increment in the forest extension was the main driver of change with respect to hydrology, in Sierra de Guadarrama and Sierra Nevada the landscape change pattern was lower, being changes over precipitation, snow and temperature the major impacts over hydrological dynamics.

Confirmación de recepción del resumen presentado:



info@congresosociedadibericaecologia2019.net

mar 10/07, 23:27

Perez Silos, Ignacio

Responder

Elementos de acción

Thank you for your submitting a contribution to the 1st Meeting of the Iberian Ecological Society (SIBECOL).

Your contribution has been recorded with id. number: **555**

Keep that number. You can use this reference for any notification regarding your contribution.

You will be able to log-back here and return to edit your contribution at any time until the submission deadline has passed. Afterwards you will not be able to amend any item (session, type of contribution, title, summary or sequential list of authors).

Abstracts that are incomplete or received after the deadline will not be considered. Please be sure to submit the final-revised version of your contribution before the 10th of July of 2018.

For any further question please contact the Technical Secretariat at info@congresosociedadibericaecologia2019.net.