



SIERRA
NEVADA

PARQUE NACIONAL
PARQUE NATURAL



Organización
de las Naciones Unidas
para la Educación,
la Ciencia y la Cultura

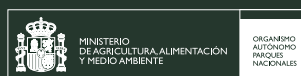


La huella del Cambio Global en Sierra Nevada: Retos para la conservación

Octubre 2015



Colaboran:



			
Tinta sin metales pesados y papeles procedentes de una gestión forestal sostenible			
Impacto ambiental		Agotamiento de recursos fósiles	
por producto impreso	1,21 kg petróleo eq	3,46 Kg CO ₂ eq	
por 100 g de producto	0,09 kg petróleo eq	0,26 Kg CO ₂ eq	
% medio de un ciudadano europeo por día	26,48 %	11,27 %	

LA HUELLA DEL CAMBIO GLOBAL EN SIERRA NEVADA: RETOS PARA LA CONSERVACIÓN

Edita: Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Junta de Andalucía

Editores: Regino Jesús Zamora Rodríguez, Antonio Jesús Pérez Luque, Francisco Javier Bonet García, José Miguel Barea Azcón, Rut Aspizua Cantón.

Coordinadores Técnicos: Fco. Javier Sánchez Gutiérrez, Ignacio Henares Civantos.

Coordinador Científico: Regino Jesús Zamora Rodríguez.

Dirección Facultativa: Blanca Ramos Losada y Fco. Javier Cano-Manuel León.

Diseño gráfico y maquetación: Creados Visual S.L.

Como citar este documento:

Zamora, R., Pérez-Luque, A.J., Bonet, F.J., Barea-Azcón, J.M. y Aspizua, R. (editores). 2015. *La huella del cambio global en Sierra Nevada: Retos para la conservación*. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Junta de Andalucía. 208 pp.

Una ficha debe citarse como:

Galiana-García, M., Rubio, S. y Galindo, F.J. 2015. Seguimiento de las poblaciones de trucha común. Pp.: 77-80. En: Zamora, R., Pérez-Luque, A.J., Bonet, F.J., Barea-Azcón, J.M. y Aspizua, R. (editores). 2015. *La huella del cambio global en Sierra Nevada: Retos para la conservación*. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Junta de Andalucía.

Referencias legales específicas:

Decreto 24/2007, de 30 de enero, por el que se declara el Espacio Natural de Sierra Nevada y se regulan los órganos de gestión y participación de los Espacios Naturales de Doñana y Sierra Nevada.

Decreto 238/2011, de 12 de julio, por el que se establece la ordenación y gestión de Sierra Nevada.

Acuerdo de 3 de septiembre de 2002, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba la adopción de una estrategia autonómica ante el cambio climático.

Acuerdo de 5 de junio de 2007, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Plan Andaluz de Acción por el Clima: Programa de Mitigación.

Acuerdo de 3 de agosto de 2010, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Programa Andaluz de Adaptación al Cambio Climático.

Acuerdo de 31 de enero de 2012, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Plan Andaluz de Acción por el Clima: Programa de Comunicación.

Créditos fotográficos:

José Antonio Algarra Ávila: 17 (inf., izda.); Carmelina Alvares Guerrero: 60; Enrique Ávila López: 32; Rut Aspizua Cantón: 152 (izp.), 155, 163 y 174; José Miguel Barea Azcón: 4, 29, 51, 68, 69, 72, 89, 108, 124, 130, 131, 135, 148, 162, 173, 177 y 204; Francisco Javier Bonet García: 20 y 61; M^a Teresa Bonet García: 62; CMAOT: 18 y 158; Eva M^a Cañadas Sánchez: 83; Fernando Castro Ojeda: 180; Antonio Extremera Salinas: 192; Antonio Gómez Ortíz: 38; Emilio González Miras: 104 y 105; Antonio José Herrera Martínez: 115; Javier Herrero Lantarón: 17(sup. e inf., dcha.); José Antonio Hódar Correa: 160.; José Enrique Larios López: 77; Alexandro B. Leverkus: 156; Francisco Megías Puerta: 80; Ricardo Moreno Llorca: 138 y 185; José Miguel Muñoz Díaz: 101, 150; Fco. Javier Navarro Gómez-Menor: 152 (dcha.); Manuel Otero Pérez: 92 y 112; José Vicente Pérez: 175; Antonio Jesús Pérez Luque: 65 y 170; Enrique Pérez Sánchez Cañete: 145 (izda.); Juan Carlos Poveda Vera: 117; Borja Ruiz Reverter: 145 (dcha.); Ramón Sánchez Arana: 46; Cristina P. Sánchez Rojas: 96; Penélope Serrano Ortíz: 145 (centro) y Manuel Villar Argai: 85.

© de la presente edición 2015, Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, Junta de Andalucía.

Depósito Legal: Gr/1308-2015

I.S.B.N.: 978-84-338-5814-6

Imprime: Imprenta Luque



La huella del Cambio Global en Sierra Nevada: Retos para la conservación

Octubre 2015



ugr | Universidad
de Granada

Colaboran:





Las nubes se retiran y tras ellas aparece una de las escenas más características de la vertiente norte de Sierra Nevada: El Veleta y el Cerro de los Machos

Índice

08 > INTRODUCCIÓN

OBSERVATORIO DEL CAMBIO GLOBAL DE SIERRA NEVADA: PRIMEROS RESULTADOS

20 > 1. TENDENCIAS DEL CLIMA PASADO Y PREDICCIONES A FUTURO: RESULTADOS PRELIMINARES

22 > 1.1 Evolución del clima en los últimos 50 años en Sierra Nevada

25 > 1.2. El clima en Sierra Nevada: presente y futuro

30 > Bibliografía

32 > 2. CARACTERIZACIÓN DE LA CUBIERTA DE NIEVE Y DEL RÉGIMEN TÉRMICO EN LAS CUMBRES DE SIERRA NEVADA

34 > 2.1. Seguimiento de las características físicas de la capa de nieve

37 > 2.2. Degradación de hielos glaciares relictos y *permafrost* en Sierra Nevada

39 > 2.3. Régimen térmico del suelo

41 > 2.4. Análisis de tendencias (2000-2014) en la cubierta de nieve mediante satélite (sensor MODIS)

45 > Bibliografía

46 > 3. CAMBIOS DE USO DEL SUELO Y DE LA CUBIERTA VEGETAL EN SIERRA NEVADA

48 > 3.1. Reconstrucción de la vegetación a partir del análisis palinológico

51 > 3.2. Análisis de indicadores paleolimnológicos en las lagunas de Sierra Nevada

54 > 3.3. Evolución de los usos del suelo en Sierra Nevada en los últimos 50 años y cambios en el paisaje

57 > 3.4. Análisis histórico de los cambios socio-ecológicos en el municipio de Cáñar (Alpujarra de Sierra Nevada) en los últimos 5 siglos

61 > 3.5. Sistemas históricos de regadío y paisajes culturales de Sierra Nevada

64 > 3.6. La importancia de los usos del suelo pasados en la regeneración natural de quercíneas bajo repoblaciones de coníferas

66 > Bibliografía

68 > 4. IMPACTOS DEL CAMBIO GLOBAL EN LOS RÍOS Y LAGOS DE MONTAÑA

- 70 > 4.1. Seguimiento de factores físico-químicos y caudales en los ríos de Sierra Nevada
- 73 > 4.2. Cambios en la riqueza, abundancia y composición de las comunidades de invertebrados bentónicos
- 77 > 4.3. Seguimiento de las poblaciones de trucha común
- 81 > 4.4. Centinelas del cambio global (I): las algas mixotróficas en La Laguna de La Caldera
- 84 > 4.5. Centinelas del cambio global (II): los consumidores herbívoros en La Laguna de La Caldera
- 90 > Bibliografía

92 > 5. TENDENCIAS POBLACIONALES

- 94 > 5.1. Comunidades vegetales de alta montaña: GLORIA
- 97 > 5.2. Tendencias de la flora de Sierra Nevada
- 102 > 5.3. Anfibios y cambio global en Sierra Nevada
- 106 > 5.4. Cambios en las comunidades de aves de Sierra Nevada
- 109 > 5.5. Dinámica temporal de las poblaciones de aves rapaces rupícolas en Sierra Nevada
- 113 > 5.6. Demografía de poblaciones de ungulados silvestres y prevalencia de enfermedades
- 118 > 5.7. Cambio en los rangos altitudinales de insectos en Sierra Nevada: evidencias del cambio climático
- 121 > Bibliografía

124 > 6. FENOLOGÍA

- 126 > 6.1. Cambios temporales en la diversidad, abundancia y fenología de las comunidades vegetales: un estudio de 25 años en los borreguiles
- 128 > 6.2. Cambios en la floración a lo largo de gradientes ambientales
- 131 > 6.3. Fenología de mariposas diurnas en Sierra Nevada
- 136 > Bibliografía

138 > 7. CUANTIFICACIÓN DE FLUJOS DE CARBONO EN SISTEMAS NATURALES Y PERTURBADOS: EVALUACIÓN DE FUENTES Y SUMIDEROS DE CO₂

- 140 > 7.1. Cambios en la productividad de la vegetación mediante teledetección
- 144 > 7.2. Intercambios de CO₂ y vapor de agua a escala de ecosistema
- 147 > Bibliografía

148 > 8. HACIA UNA GESTIÓN QUE FAVOREZCA LA ADAPTACIÓN DE LOS ECOSISTEMAS FORESTALES NEVADENSES AL CAMBIO GLOBAL

- 151 > 8.1. Historia reciente de la gestión forestal en Sierra Nevada: Implicaciones para la adaptación al cambio global
- 155 > 8.2. Diseño y seguimiento de la restauración post-incendio en Lanjarón
- 159 > 8.3. Dinámica poblacional de la procesionaria del pino: respuestas a los cambios en el clima y en el manejo forestal
- 162 > 8.4. Naturalización de pinares de repoblación: preparando el bosque para el cambio
- 167 > 8.5. Impactos del cambio global en los robledales de Sierra Nevada: algunas evidencias y recomendaciones de manejo
- 174 > 8.6. Análisis de la susceptibilidad frente a inestabilidades de ladera en el Parque Nacional de Sierra Nevada
- 178 > Bibliografía

180 > 9. SOCIOECONOMÍA Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

- 182 > 9.1. Evolución y distribución espacial de los flujos de servicios de los ecosistemas del sistema socioecológico del Espacio Natural de Sierra Nevada
- 184 > 9.2. Análisis temporal del bienestar en los municipios del Espacio Natural de Sierra Nevada
- 186 > Bibliografía

188 > 10. SIERRA NEVADA COMO OBSERVATORIO DEL CAMBIO GLOBAL A ESCALA PLANETARIA

- 190 > 10.1. Seguimiento de la actividad tormentosa en el sistema Tierra a través de la estación ELF “Juan Antonio Morente” de Sierra Nevada
- 193 > 10.2. Seguimiento de contaminantes atmosféricos
- 198 > 10.3. Seguimiento de la deposición atmosférica de aerosoles en Sierra Nevada
- 200 > Bibliografía

202 > AUTORES

205 > ÍNDICE DE TÉRMINOS

207 > AGRADECIMIENTOS



Observatorio del Cambio Global de Sierra Nevada: Primeros resultados

Los problemas ambientales y socioeconómicos generados por el cambio global constituyen el desafío más importante al que se enfrenta nuestra sociedad. En la actualidad, hay un consenso general sobre la magnitud de los cambios en el Planeta debidos a los impactos provocados por las actividades humanas. La atmósfera y el océano se están calentado y las concentraciones de CO₂ han aumentado hasta niveles sin precedentes desde hace, por lo menos, 800.000 años [1]. Estamos ya instalados en la era del cambio, y nos toca vivir una nueva etapa en la historia de la Tierra dominada por el hombre, el Antropoceno [2].

La mayoría de los modelos climáticos pronostican para la Cuenca Mediterránea un aumento de la temperatura, una disminución de las

precipitaciones y un aumento general de la variabilidad climática [3]. Las consecuencias socioeconómicas de estos cambios se agravan en los ecosistemas mediterráneos por su larga historia de explotación humana, lo que puede provocar respuestas ecológicas muy complejas [4].

A pesar de las incertidumbres sobre las proyecciones climáticas y sus efectos en los procesos biofísicos, ya existe información científica suficiente para gestionar la transición de nuestros ecosistemas en un contexto de cambio global. Es un hecho contrastable que, en Andalucía, hay una tradición de gestión ambiental acumulada durante las últimas décadas, con experiencias que han sido pioneras por su novedad y relevancia en

España y Europa. Es también una realidad que los grupos de investigación de las instituciones académicas están generando un conocimiento científico considerable sobre el funcionamiento de los sistemas naturales. Este conocimiento es de gran valor para que los responsables de la gestión medioambiental tomen decisiones basándose en información relevante y actualizada. Se dan por tanto las condiciones objetivas para que los que generan el conocimiento y los que lo aplican en temas ambientales trabajen en estrecho contacto, aportando un valor añadido al trabajo que desarrollan ambos colectivos por separado. Ésta es la apuesta decidida de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio en el Espacio Natural Sierra Nevada (Reserva de la Biosfera, Parque Nacional y Parque Natural),

a través del Observatorio del Cambio Global de Sierra Nevada (OCGSN) en el que están implicados investigadores, gestores y técnicos [5].

La importancia del Espacio Natural de Sierra Nevada como Observatorio del Cambio Global

Sierra Nevada forma parte de la primera Lista Verde Mundial de Áreas Protegidas Bien Gestionadas, que ha acreditado la Unión Internacional de Conservación de la Naturaleza (UICN) en 2014. Una parte importante de este reconocimiento se sustenta en un modelo de gestión basado en la transferencia del conocimiento científico, la participación social y la coordinación interadministrativa. En este modelo juega un papel fundamental el Observatorio del Cambio Global de Sierra Nevada.

La historia de manejo de los ecosistemas de Sierra Nevada en el pasado es bien distinta a la

evaluar a largo plazo las respuestas de los ecosistemas y su capacidad de adaptación. Por su posición geográfica y amplitud de su rango altitudinal, Sierra Nevada es, además, una atalaya privilegiada de observación de procesos globales, ya que sus ecosistemas actúan como sensores para la detección temprana de las señales de cambio que ocurren en todo el planeta.

Los capítulos que forman este libro son una buena muestra de la importancia de Sierra Nevada como laboratorio de campo y observatorio de procesos remotos, poniendo también de manifiesto su relevancia territorial como fuente de servicios ecosistémicos a la región circundante.

El Observatorio del Cambio Global de Sierra Nevada

Desde el año 2007 se ha puesto en marcha el Observatorio del Cambio Global de Sierra

Para cada uno de los ámbitos temáticos se definieron metodologías de seguimiento con objeto de evaluar tanto el estado de las funciones ecológicas clave, como la estructura de los principales ecosistemas nevadenses y los posibles impactos derivados del cambio global en Sierra Nevada [7].

Nuestro programa de seguimiento está basado en preguntas concretas sobre los impactos del cambio global, el funcionamiento de los sistemas naturales y sus respuestas previsibles bajo los nuevos escenarios de cambio [8]. Favorecemos la colaboración entre los diferentes equipos pertenecientes a diversas instituciones (investigadores de la Universidad de Granada, CSIC y otras instituciones académicas nacionales e internacionales, gestores, técnicos y agentes de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, y Agencia de Medio Ambiente y Agua), para poder abordar planes transversales de trabajo con objetivos integradores. Los capítulos de este dossier,

**PLANIFICACIÓN
CONSIDERANDO
DIFERENTES ESCALAS
ESPACIALES Y
TEMPORALES**

**RIGOR
METODOLÓGICO
PARA CUANTIFICAR
VARIABLES
BIOFÍSICAS Y
SOCIOECONÓMICAS
ESENCIALES**

**GESTIÓN
INTEGRAL DE LA
INFORMACIÓN
GENERADA**

**CONOCIMIENTO
PARA LA
ADAPTACIÓN**

actual, y el futuro depara escenarios climáticos y regímenes de perturbaciones muy diferentes a los pasados y presentes. Esta realidad dinámica necesita de nuevos enfoques en la gestión del medio natural, que incorporen como objetivos fundamentales el fomento de la integridad y la resiliencia ecológica [6].

Vivimos ya en una nueva era, el Antropoceno, y necesitamos de observatorios del sistema Tierra para hacer diagnóstico y prospección de la salud del planeta. En un escenario de cambio global, un espacio protegido como Sierra Nevada debe ser, además de una joya de la corona de nuestro patrimonio natural, un laboratorio donde se puedan realizar y mantener operativos experimentos de campo que simulen diferentes condiciones ambientales y permitan

Nevada, un ambicioso proyecto promovido por la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía con la coordinación científica de la Universidad de Granada – Centro Andaluz de Medio Ambiente (IISTA, Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía) y con la colaboración del Organismo Autónomo Parques Nacionales y la Fundación Biodiversidad, para desarrollar un programa de seguimiento y gestión de la información.

El diseño del Programa de Seguimiento del Observatorio se ha basado en el marco conceptual y los ámbitos temáticos propuestos por la iniciativa GLOCHAMORE (GLObal CHAnge in MOUNTain REgions <http://mri.scnatweb.ch/projects/glochamore>) auspiciada por la UNESCO.

firmados por 69 autores pertenecientes a diferentes organismos y entidades públicas, son una buena muestra de las sinergias generadas. Nuestra apuesta requiere de una coordinación acorde con la dimensión de la problemática global. El propio concepto de Observatorio del Cambio Global de Sierra Nevada lleva implícita la necesidad de desarrollar y coordinar nuestras tareas en el ámbito regional, nacional e internacional. Esta vocación se pone de manifiesto con la implicación del Observatorio del Cambio Global de Sierra Nevada en el diseño y puesta en marcha de otros proyectos similares tanto a escala regional como nacional e internacional (LTER, LifeWatch, NEON, EU BON, ECOPOTENTIAL, Red de Observatorios de Cambio Global en Andalucía, Red de Seguimiento del Cambio Global en Parques Nacionales de España).



Nuestro programa está desarrollando los siguientes objetivos generales:

- Poner en valor toda la información científico-técnica existente sobre los sistemas naturales de Sierra Nevada.
- Evaluar, mediante protocolos metodológicos estandarizados, el funcionamiento de los ecosistemas del Espacio Natural Sierra Nevada, sus procesos naturales y su dinámica, en un horizonte temporal de medio-largo plazo.
- Conocer la dinámica poblacional, variaciones fenológicas y problemática de conservación de diversos organismos clave como indicadores de procesos ecológicos que pueden verse afectados por el cambio global.

- Identificar los posibles efectos del cambio global en las especies, ecosistemas y recursos naturales monitoreados, proporcionando una visión de las tendencias del cambio que permita construir capacidad de adaptación.
- Diseñar mecanismos para evaluar la efectividad de las actividades de manejo llevadas a cabo en Sierra Nevada, con objeto de proponer los ajustes pertinentes para implementar un modelo de gestión adaptativa.

En definitiva, nuestro programa pretende diagnosticar el grado de exposición al cambio de los ecosistemas nevadenses en los nuevos escenarios, su grado de sensibilidad a dicho cambio, y su capacidad de adaptación, fomentando la resistencia y resiliencia de los ecosistemas mediante las medidas de gestión adecuadas.

Conocimiento científico-técnico para la gestión adaptativa

Un pilar fundamental de nuestro Espacio Natural es que la gestión medioambiental se debe sustentar en el conocimiento científico-técnico más actualizado y contrastado. Frente a la tradicional gestión carente de seguimiento, hemos apostado por la “gestión adaptativa” basada en el seguimiento y contraste de las actuaciones, para evaluar los efectos del tratamiento sometido a prueba [9]. Hemos puesto en práctica esta filosofía, planteando desde el principio las preguntas relevantes, definiendo los objetivos que se espera conseguir con las actuaciones y concretando los aspectos metodológicos y analíticos necesarios para abordarlos, así como la dimensión espacial y temporal de las actuaciones y su seguimiento, planificando el trabajo que deben desarrollar los diferentes actores implicados (investigadores, técnicos, empresas, agentes de medio ambiente).

Figura 1



Hipótesis de los impactos del cambio global en Sierra Nevada

Todos los proyectos que hemos iniciado bajo esta nueva filosofía cuentan con un marco conceptual de referencia y una planificación sustentada en preguntas (hipótesis) sobre el funcionamiento de los sistemas ecológicos, y sus previsibles respuestas al cambio global.

Fomentar la adaptación frente al cambio global representa favorecer la capacidad de autoorganización de los ecosistemas, usando como herramientas ecológicas la diversidad funcional y la heterogeneidad espacial [10]. Un ejemplo son las actuaciones para mejorar la resistencia y resiliencia de bosques y matorrales frente al cambio climático en Sierra Nevada, aplicando

diversos tipos de tratamientos en función de las características ecológicas y la historia de manejo de la zona (ver Capítulo 8 de este libro). Un aspecto crucial de estos proyectos de gestión adaptativa es su carácter de demostración, para que se puedan poner en práctica también fuera de Sierra Nevada.

¿Qué hemos aprendido sobre los efectos del cambio global en los ecosistemas de Sierra Nevada?

Disponemos ya de una información valiosa acumulada durante las últimas décadas, que proviene del trabajo de los investigadores, gestores y

personal técnico encargado de la conservación. Gracias a ese esfuerzo común, se pueden identificar una serie de hipótesis sobre los impactos del cambio global en Sierra Nevada (Figura 1).

En este libro presentamos un compendio de las principales evidencias de impacto del cambio global sobre los ecosistemas de Sierra Nevada. Para elaborar este documento se ha recopilado información tanto del programa de seguimiento del Observatorio del Cambio Global de Sierra Nevada como de grupos de investigación que llevan décadas trabajando en este ámbito (ver Figura 6).

Figura 2



Principales logros del Observatorio del Cambio Global de Sierra Nevada

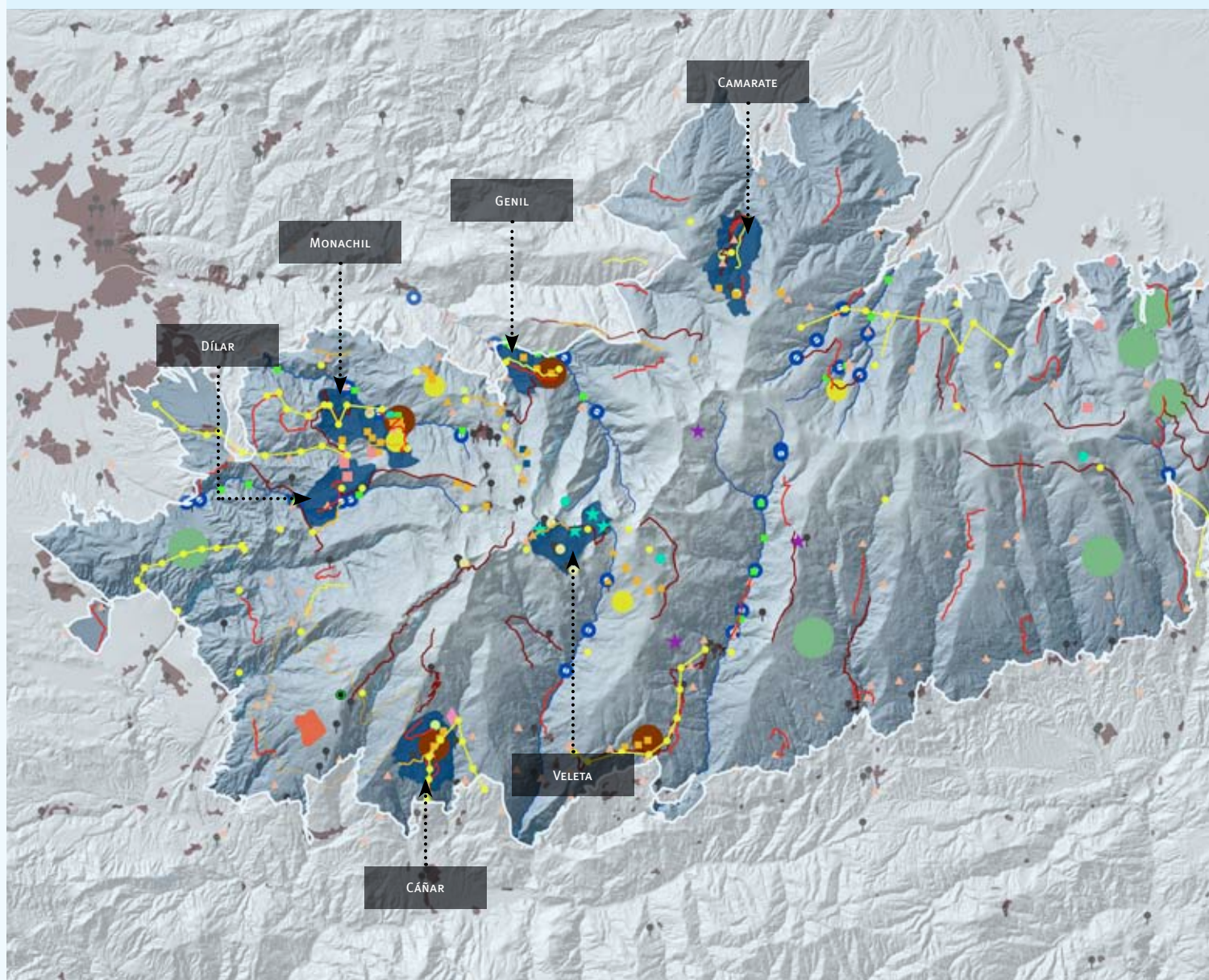
Para estudiar los efectos del cambio global en un territorio concreto no es suficiente con medir variables biofísicas. Es necesario que los puntos de muestreo estén distribuidos espacialmente según un plan y unos objetivos concretos. El programa de seguimiento del Observatorio sigue esta filosofía. Se trata de definir una serie de zonas con una alta concentración de puntos de muestreo. Cada una de esas zonas se denomina EMI: Estación de Monitoreo Intensivo. Este marco conceptual ha resultado

especialmente útil para orientar la captura de datos hacia ciertos tipos de ecosistemas y para permitir la integración de nuestro programa con otras iniciativas internacionales.

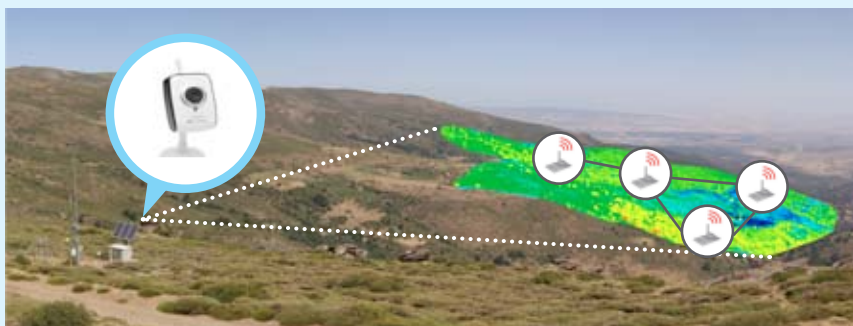
Cada EMI corresponde con un ecosistema relevante de Sierra Nevada (altas cumbres, bosques de *Quercus*, matorral de alta montaña, matorrales semiáridos o pinares de repoblación). Además en cada EMI hay al menos una estación meteorológica con diversos

sensores. En torno a estas estaciones se ubican los seguimientos de variables biológicas y ecológicas del programa de seguimiento. Asimismo se ha recopilado información sobre la cobertura de la nieve y la actividad fotosintética de cada EMI a partir de imágenes de satélite. Por último se ha planificado la instalación de redes sensoriales inalámbricas en varias EMIs. Toda la información generada se almacena en el sistema de información del Observatorio.

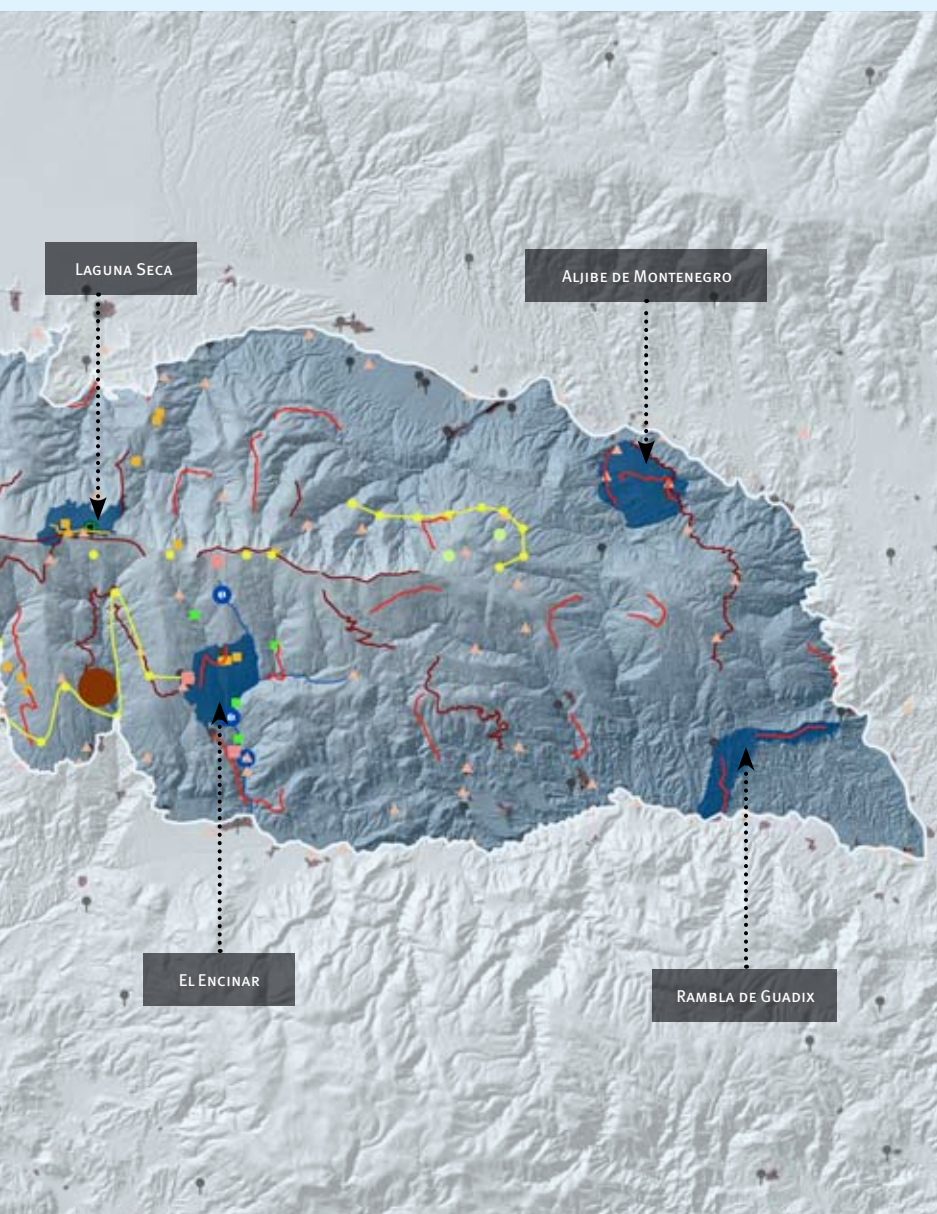
Figura 3



Distribución espacial de los puntos de muestreo del programa de seguimiento y las Estaciones de Monitoreo Intensivo



Cada EMI cuenta con una estación meteorológica. En la EMI de Cáñar se ha instalado una red sensorial inalámbrica y una cámara para cuantificar la actividad fotosintética utilizando índices de vegetación.



Metodologías de Seguimiento. Leyenda

- Estaciones meteorológicas
- ★ Estaciones seguimiento nieve
- Físico-química en ríos y lagunas
- Muestreo macroinvertebrados
- ~ Seguimiento trucha común
- ◆ Contaminación atmosférica
- ◆ Seguimiento actuaciones forestales post-incendio
- Evaluación de gestión forestal en encinares-robleales
- Evaluación de gestión forestal en pinares de repoblación
- Evaluación de gestión forestal en enebro-piñal
- Fenología
- Tendencias poblacionales flora amenazada
- Proyecto GLORIA
- Gradientes altitudinales en enebro-piñal
- Bosques naturales y matorrales de montaña
- Borreguiles
- Bosques de ribera
- ~ Seguimiento cabra montés ibérica. Enfermedades infecciosas en cabra montés
- Torres de flujo de carbono/vapor de agua
- Caracterización de la cubierta vegetal en 1956
- ▲ Seguimiento de micromamíferos
- ~ Seguimiento de mamíferos carnívoros
- ~ Seguimiento de aves dispersantes
- ~ Seguimiento de mariposas
- ▲ Artrópodos terrestres de alta montaña
- Procesionaria del pino
- Anfibios y Reptiles
- Aves rapaces
- Seguimiento de la nieve mediante satélite (MODIS)
- Índices de vegetación mediante satélite (MODIS)
- Caracterización socioeconómica
- Mapa de vegetación histórica mediante ortofotos
- Reconstrucción histórica mediante documentos antiguos
- Análisis retrospectivo de la gestión forestal.

Natural area



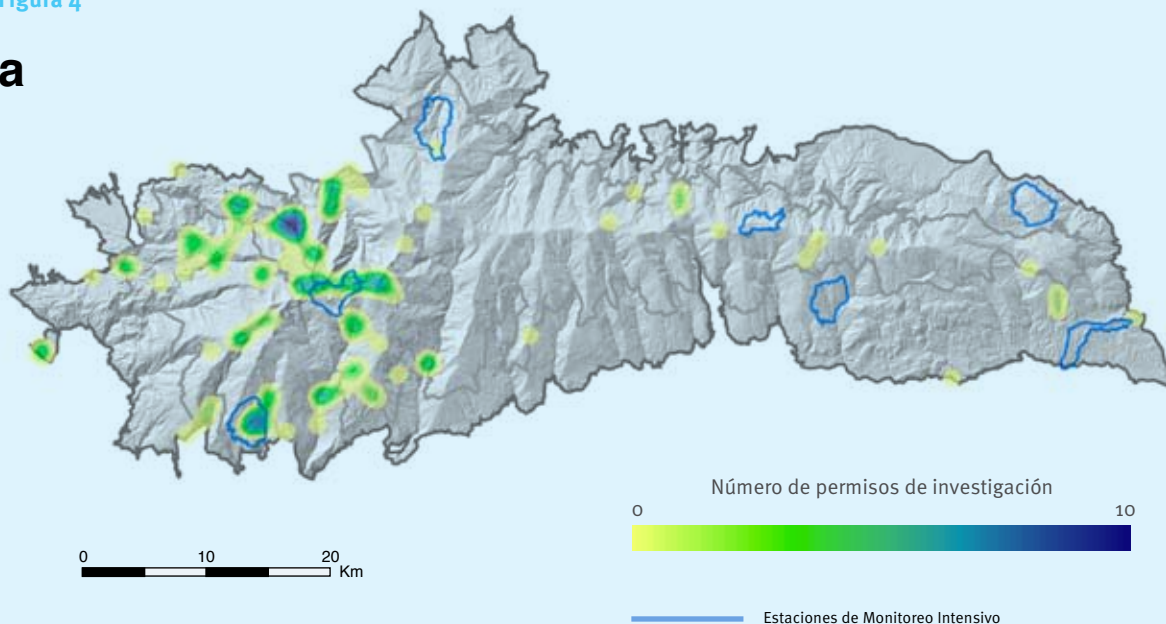
Localización espacial de las actividades de investigación y las actuaciones de manejo forestal en Sierra Nevada

Tanto los trabajos de investigación como las actuaciones forestales tienen un claro reflejo espacial en el territorio. El mapa (a) muestra dónde se han realizado los proyectos de investigación en Sierra Nevada durante los años 2009 a 2013. Se representa la densidad de permisos de muestreo concedidos a los investi-

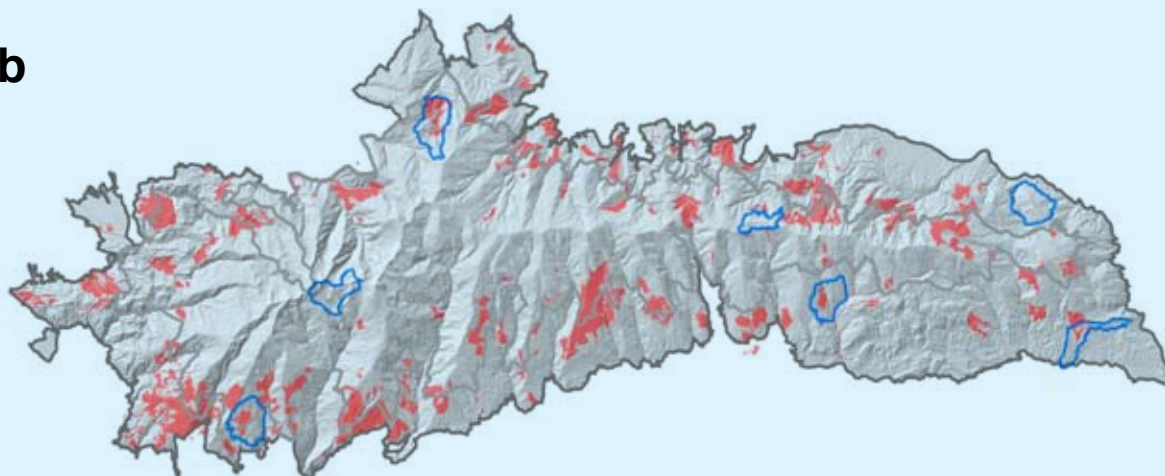
gadores durante esos años. El mapa B muestra la distribución espacial de las principales actuaciones forestales (repoblaciones, tratamientos selvícolas, etc.) realizadas en Sierra Nevada desde 1992 hasta 2014. En ambos mapas se superpone la distribución de las Estaciones de Monitoreo Intensivo.

Figura 4

a



b



(a) Localización de los proyectos de investigación en Sierra Nevada durante 2009-2013. (b) Distribución espacial de las actuaciones forestales desde 1992 hasta 2014 en Sierra Nevada

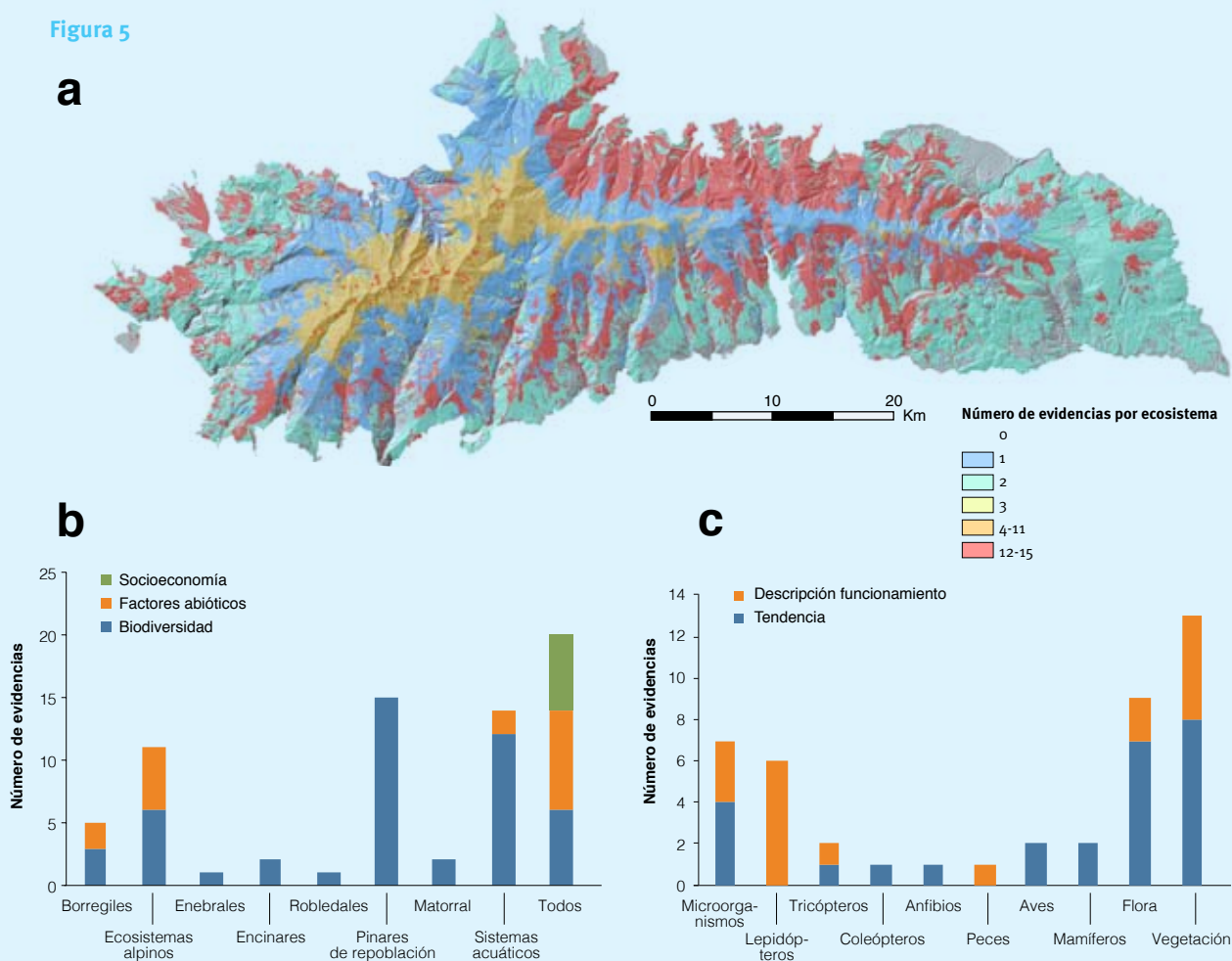
Resumen de los resultados obtenidos por el Observatorio del Cambio Global de Sierra Nevada

En este libro se describen con detalle los impactos del cambio global sobre los ecosistemas de Sierra Nevada. En total hemos recopilado 84 evidencias relevantes que se pueden clasificar según diversos criterios.

Desde un punto de vista espacial, se observa que en los ecosistemas de alta montaña y en los sistemas acuáticos (ríos y lagu-

nas) es donde se han recopilado más evidencias. Esto se debe a que en estos sistemas se han realizado investigaciones ecológicas desde hace décadas. Lo mismo ocurre con los pinares de repoblación, que muestran muchas evidencias relacionadas con las actuaciones de adaptación frente al cambio climático. Los ecosistemas donde se muestra mayor densidad de puntos en el mapa inferior son los que contienen más evidencias.

Figura 5

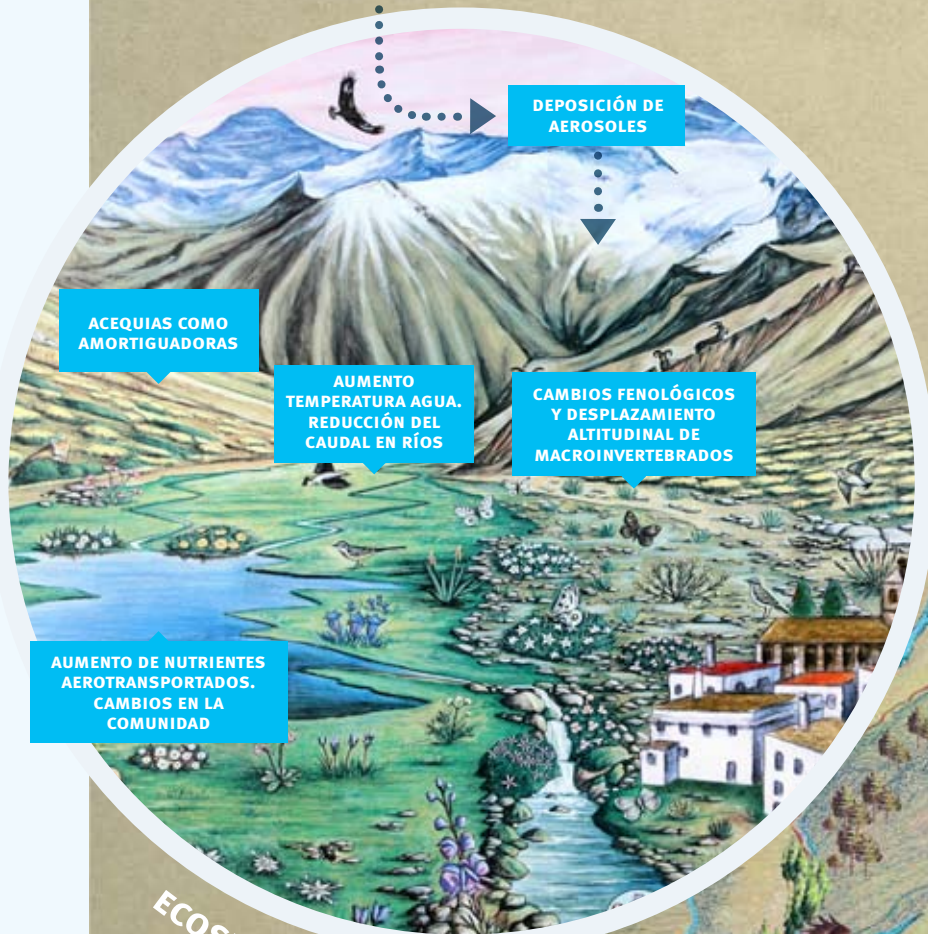


(a) Distribución espacial de las evidencias de cambio global por ecosistemas. (b) Clasificación de las evidencias por tipo y ecosistemas. (c) Tipo de evidencias por taxón afectado.

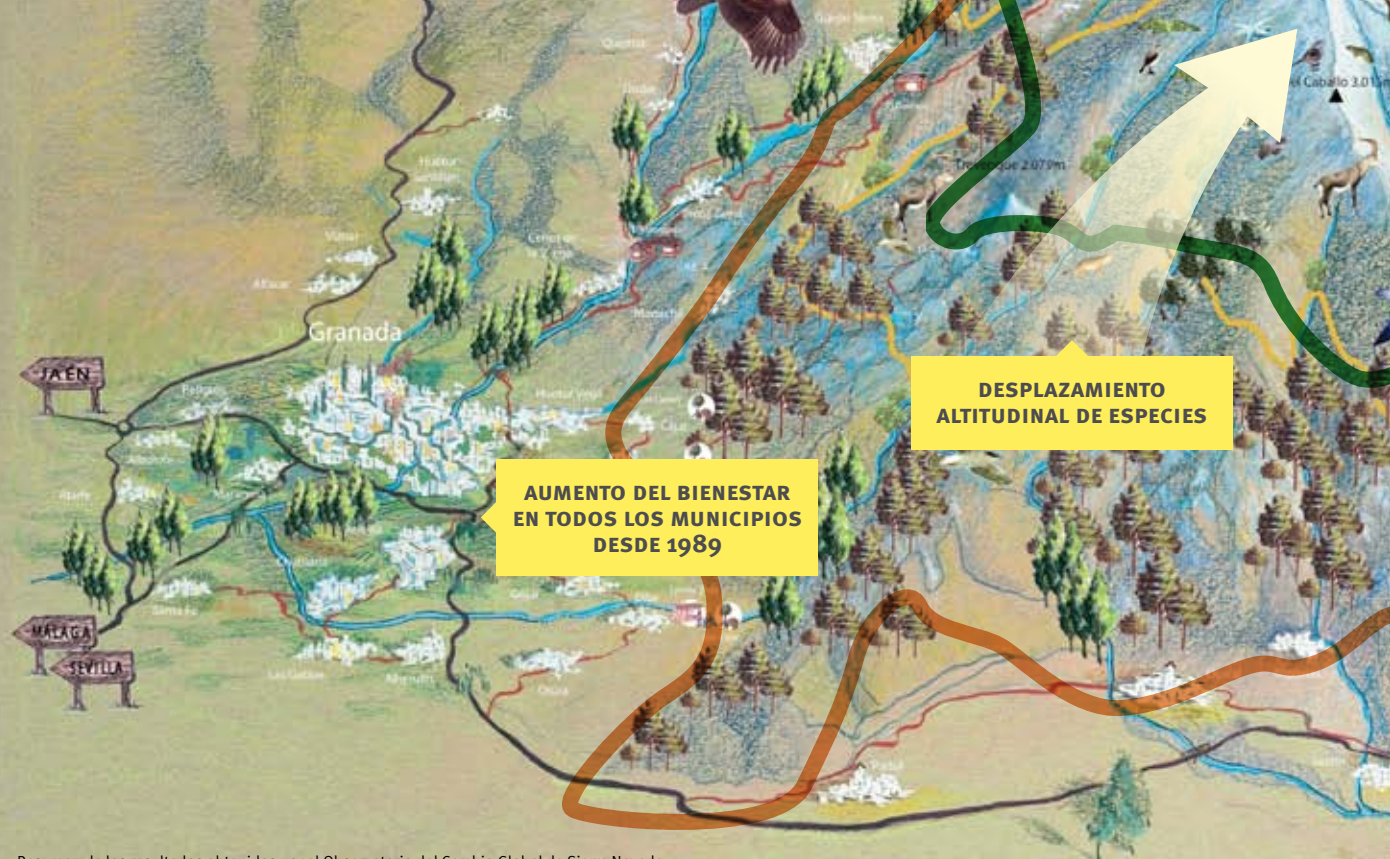
También se pueden clasificar en función de los taxones afectados y su papel como indicadores de proceso (Figura 5c). Así, algunas evidencias aportan información sobre tendencias, mientras que otras describen el funcionamiento de procesos (ej. relaciones causa-efecto). Se observa cómo la flora y la vegetación reúnen la mayoría de las evidencias.

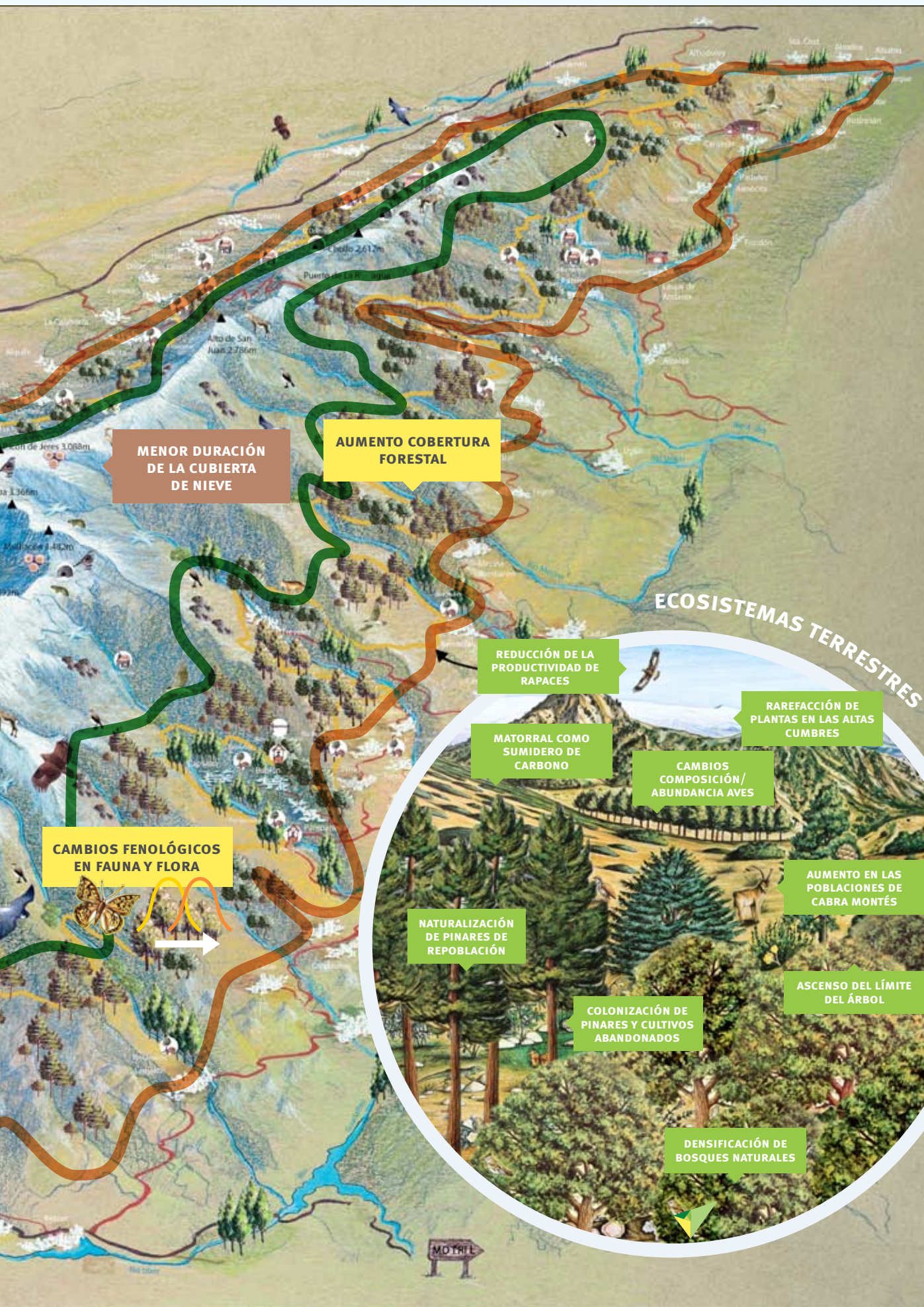
Las evidencias encontradas pueden clasificarse atendiendo a si afectan a factores abióticos o a elementos de la biodiversidad (Figura 5b). Los cambios en factores abióticos se observan sobre todo en los borreguiles y en ecosistemas acuáticos. A escala de todos los ecosistemas encontramos evidencias relacionadas con aspectos socioeconómicos y con la provisión de servicios ecosistémicos.

Figura 6



ECOSISTEMAS ACUÁTICOS





**MEJOR DURACIÓN
DE LA CUBIERTA
DE NIEVE**

**AUMENTO COBERTURA
FORESTAL**

ECOSISTEMAS TERRESTRES

**REDUCCIÓN DE LA
PRODUCTIVIDAD DE
RAPACES**

**RAREFACCIÓN DE
PLANTAS EN LAS ALTAS
CUMBRES**

**MATORRAL COMO
SUMIDERO DE
CARBONO**

**CAMBIOS
COMPOSICIÓN/
ABUNDANCIA AVES**

**CAMBIOS FENOLÓGICOS
EN FAUNA Y FLORA**

**AUMENTO EN LAS
POBLACIONES DE
CABRA MONTÉS**

**NATURALIZACIÓN
DE PINARES DE
REPOBLACIÓN**

**COLONIZACIÓN DE
PINARES Y CULTIVOS
ABANDONADOS**

**ASCENSO DEL LÍMITE
DEL ÁRBOL**

**DENSIFICACIÓN DE
BOSQUES NATURALES**

Bibliografía

› Más referencias en http://refbase.iecolab.es/ref_dossier_resultados.html

- [1] IPCC (2014). *Summary for policymakers*. Pp: 1-32. En: Field, C.B.; Barros, V.R.; Dokken, D.J.; Mach, K.J.; Mastrandrea, M.D.; Bilir, T.E.; Chatterjee, M.; Ebi, K.L.; Estrada, Y.O.; Genova, R.C.; Girma, B.; Kissel, E.S.; Levy, A.N.; MacCracken, S.; Mastrandrea, P.R. & White, L.L. (eds.). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.
- [2] Rockström, J.; Steffen, W.; Noone, K.; Persson, A.; Chapin, F.S. III; Lambin, E.F.; Lenton, T.M.; Scheffer, M.; Folke, C.; Schellnhuber, H.J.; Nykvist, B.; de Wit, C.A.; Hughes, T.; van der Leeuw, S.; Rodhe, H.; Sörlin, S.; Snyder, P.K.; Costanza, R.; Svedin, U.; Falkenmar, M.; Karlberg, L.; Corell, R.W.; Fabry, V.J.; Hansen, J.; Walker, B.; Liverman, D.; Richardson, K.; Crutzen, P. & Foley, J.A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461: 472-475.
- [3] Gao, X. & Giorgi, F. (2008). Increased aridity in the Mediterranean region under greenhouse gas forcing estimated from high resolution simulations with a regional climate model. *Global and Planetary Change*, 62, 195-209.
- [4] Doblas, E. (2013). *Conservar aprovechando. Cómo integrar el cambio global en la gestión de los montes españoles*. Bellaterra, Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals.
- [5] Sánchez, F.J. (2011). El Observatorio de Cambio Global de Sierra Nevada: nuevo enfoque en la gestión de un espacio natural protegido ante los desafíos del siglo XXI. *Boletín de la Red de Seguimiento del Cambio global en parques nacionales*, (1): 14-17. Organismo Autónomo Parques Nacionales. Madrid
- [6] Hobbs, R.J.; Cole, D.N.; Yung, L.; Zavaleta, E.S.; Aplet, G.H.; Chapin, F.S. III; Landres, P.B.; Parsons, D.J.; Stephenson, N.L.; White, P.S.; Graber, D.M.; Higgs, E.S.; Millar, C.I.; Randall, J.M.; Tonnessen, K.A. & Woodely, S. (2010). Guiding concepts for park and wilderness stewardship in an era of global environmental change. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 8(9): 483-490.
- [7] Aspizua, R.; Barea-Azcón, J.M.; Bonet, F.J.; Pérez-Luque, A.J. & Zamora, R. (Eds.) (2012). *Observatorio de Cambio Global Sierra Nevada: metodologías de seguimiento*. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía.
- [8] Lindenmayer, D.B. & Likens, G. (2009). Adaptive monitoring – a new paradigm for long-term studies and monitoring. *Trends in Ecology and Evolution*, 24: 482-486.
- [9] Aspizua, R.; Bonet, F.J.; Zamora, R.; Sánchez, F.J.; Cano-Manuel, F.J. y Henares, I. (2010). El Observatorio de Cambio Global de Sierra Nevada: hacia la gestión adaptativa de los espacios naturales. *Revista Ecosistemas*, 19 (2): 56-58.
- [10] Zamora, R. (2010). Las áreas protegidas como observatorios del cambio global. *Revista Ecosistemas*, 19 (2): 1-4.

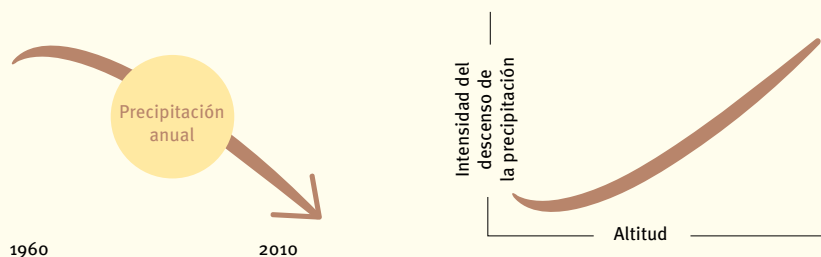
Tendencias del clima pasado y predicciones a futuro: resultados preliminares

Las variables climáticas son claves para explicar el funcionamiento, la distribución y la estructura de los ecosistemas sobre la Tierra. Los cambios en el clima provocados por las actividades humanas (p. ej.: emisiones de gases de efecto invernadero) tendrán importantes consecuencias ecológicas y socioeconómicas (según el Panel Internacional sobre Cambio Climático: IPCC). Su estudio y análisis es determinante para entender tanto el funcionamiento de los ecosistemas como sus mecanismos de provisión de servicios y los posibles cambios provocados por la actividad humana. Se han incorporado estas ideas en el programa de seguimiento del Observatorio del Cambio Global de Sierra Nevada desde sus ini-

cios (2007), realizando una importante inversión en la dotación de estaciones meteorológicas para caracterizar el clima de la montaña. También se han recopilado datos de otras decenas de estaciones previamente existentes. Gracias a esta información ha sido posible generar mapas anuales de variables climáticas de gran interés (temperatura máxima-mínima y precipitación) para la serie temporal desde 1960 hasta 2010. Asimismo, considerando los escenarios climáticos de futuro auspiciados por el IPCC, se han generado mapas de las mismas variables climáticas en Sierra Nevada para todos los años del siglo XXI. La obtención de estos mapas ha permitido realizar algunos análisis preliminares

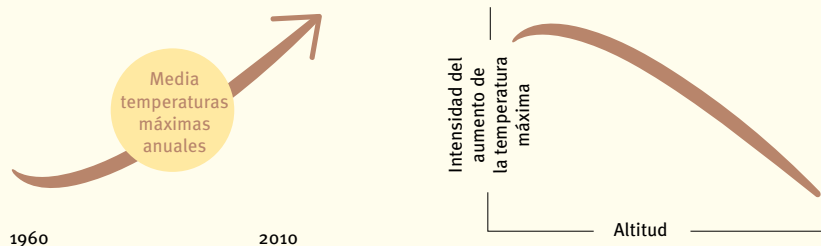
que caracterizan tanto el clima de Sierra Nevada como algunas posibles tendencias de cambio en el mismo durante las últimas décadas.

El presente capítulo muestra los resultados generados en este ámbito temático. Dichos resultados están muy relacionados con los descritos en el capítulo 2. Asimismo las tendencias y patrones observados en la nieve y el clima son los factores causales de muchas de las respuestas bióticas analizadas en otros capítulos de este libro (capítulos 4, 5, 6 y 7).



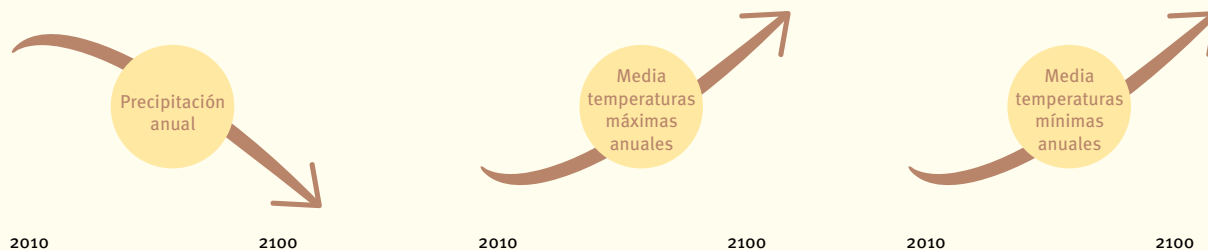
Tendencia

de descenso en la precipitación es más acusada en la zona occidental de Sierra Nevada



Correlación

entre los datos de precipitación y temperatura simulados para 2011-2013 y los tomados por las estaciones meteorológicas



Resumen gráfico de los principales resultados descritos en el presente capítulo. Se muestran tendencias temporales para las variables climáticas desde 1960 hasta la actualidad y las proyecciones a futuro. También se muestran la variación de la tendencia para la temperatura y la precipitación con respecto a la elevación.

El análisis de los mapas climáticos realizados mediante interpolación entre 1960 y 2010 arroja resultados concordantes con otros obtenidos en la cuenca Mediterránea para el mismo periodo. Se observa una tendencia hacia la reducción de la precipitación en casi toda Sierra Nevada. Esta tendencia es más intensa conforme se asciende en altitud. La tendencia a la reducción de la precipitación es más acusada en la zona occidental de Sierra Nevada. En cuanto a la

temperatura máxima, se observa una tendencia hacia el aumento en la mayor parte de Sierra Nevada. Al igual que ocurre con la precipitación, esta tendencia es más intensa en cotas altas. Tras analizar las series temporales de los datos simulados de las variables anteriores para el siglo XXI, se observa un aumento intenso en la media anual de las temperaturas máximas y otro menos intenso en la media anual de las temperaturas mínimas. Por último, hay un descenso

de las precipitaciones. La comparación de los datos climáticos (temperatura máxima/mínima y precipitación) tomados por 7 estaciones meteorológicas de Sierra Nevada con los valores simulados para los años 2011-2013 muestra una alta correlación. Esto indica que, al menos en los años analizados, se están cumpliendo en buena medida las predicciones de los escenarios de clima futuro.

1.1. Evolución del clima en los últimos 50 años en Sierra Nevada

Pérez-Luque, A.J.; Pérez-Pérez, R. y Bonet, F.J.
Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía, Universidad de Granada

Resumen

El análisis de los datos climáticos existentes en el Observatorio del Cambio Global de Sierra Nevada ha revelado un aumento de las temperaturas en los últimos 50 años, siendo éste más evidente en las temperaturas máximas que en las temperaturas mínimas. La evolución de la precipitación mostró una disminución general, observándose un patrón diferencial en las zonas orientales y en las zonas occidentales de Sierra Nevada. En estas últimas se observaron tendencias más decrecientes.

Objetivos y metodología

Se han elaborado mapas climáticos de alta resolución (100 m) para Sierra Nevada de las variables precipitación anual, temperatura media anual de las mínimas y temperatura media anual de las máximas [1]. Estos mapas representan el clima observado en Sierra Nevada para el periodo 1960-2010 y se encuentran disponibles en el Observatorio del Cambio Global de Sierra Nevada.

Se analizó la evolución temporal de cada variable en el periodo estudiado en Sierra Nevada. Para ello se aplicaron técnicas de análisis de la tendencia (test de Mann-Kendall), de forma que para cada variable climática, se caracterizaron las tendencias a nivel de pixel cuantificando su magnitud, identificando su signo (positiva o negativa) y determinando si la tendencia es significativa para el periodo analizado (50 años). A continuación se exploró el patrón espacial de las tendencias de cada una de las variables y se analizaron las tendencias en función de la elevación.

Resultados

Precipitación

Los resultados del análisis de las tendencias en la precipitación en los últimos 50 años muestran que Sierra Nevada ha sufrido un descenso en la precipitación (99,8 % de los píxeles presentan tendencias negativas). Cerca de la mitad del territorio ha sufrido una reducción significativa en la precipitación (43,45 % píxeles con tendencia negativa significativa) (Tabla 1, Figura 1). La exploración de las tendencias en la precipitación en función de la elevación mostró un claro patrón con tendencias más negativas a mayor altitud.

Temperaturas

Respecto a la media anual de las **temperaturas máximas** observamos que el 82,51 % del territorio mostró una tendencia positiva en los últimos 50 años, de los cuales un 16,5 % son tendencias significativas. El patrón en las tendencias de las medias de las temperaturas máximas con respecto a la elevación muestra que, a mayor altitud, las tendencias positivas son inferiores que a menor altitud (Figura 1). Para la media anual de las **temperaturas mínimas**, los resultados del análisis indican que el 75,5 % del territorio presenta tendencias positivas, siendo significativas menos del 0,01 % de éstas (Tabla 1).

Tabla 1

		Píxeles		Píxeles significativos	
Variable	Tendencia	n	%	n	%
Precipitación	Positiva	298	0,17	0	0
	Negativa	171.460	99,79	74.516	43,37
Temperatura máxima	Positiva	141.757	82,50	23.417	13,63
	Negativa	29.551	17,19	0	0
Temperatura mínima	Positiva	129.759	75,52	7	<0,01
	Negativa	41.762	24,30	0	0

Resultados del análisis de las tendencias (test de Mann-Kendall) anuales en los últimos 50 años para la precipitación, la media de las temperaturas máximas y la media de las temperaturas mínimas. Para cada variable se muestran el número de píxeles (n) con tendencias negativas ($\tau < 0$) y positivas ($\tau > 0$) así como el número de píxeles significativos (p-valor $< 0,05$).

Figura 1

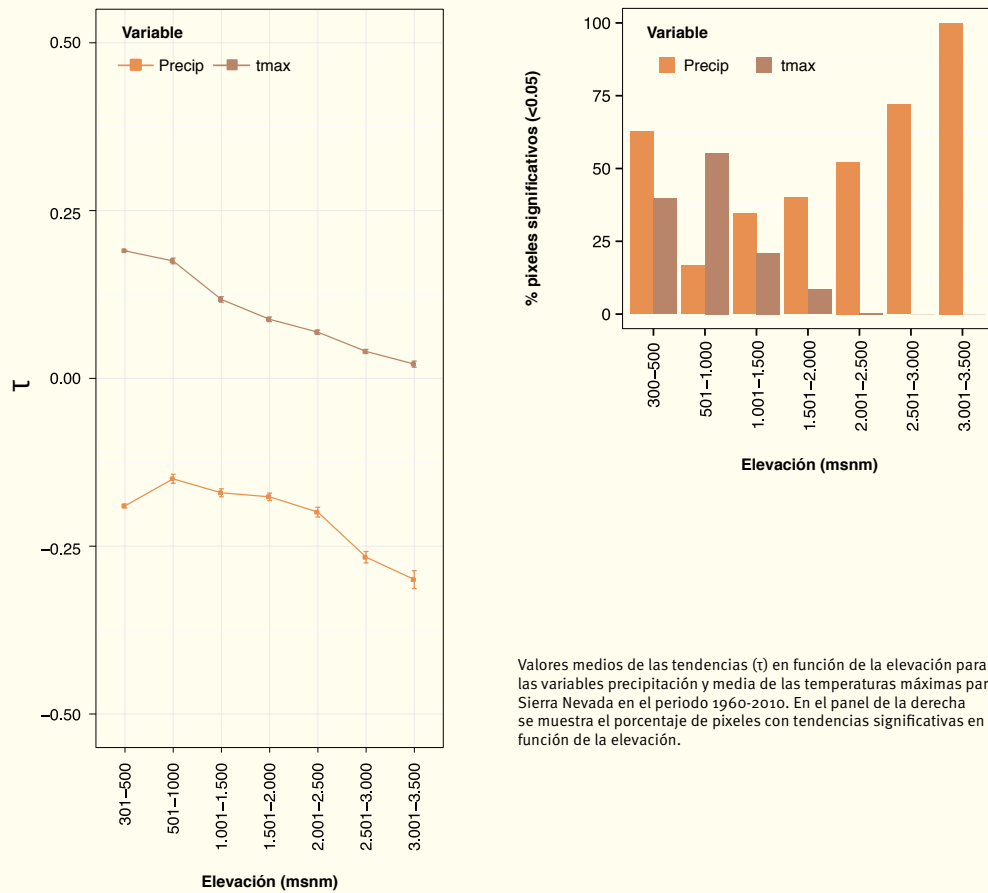
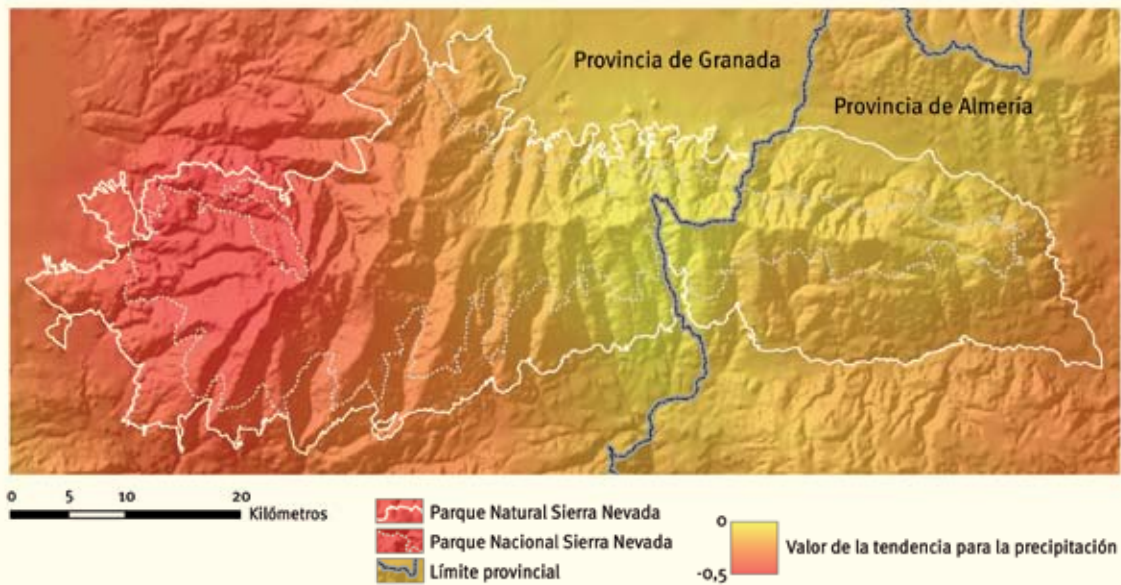


Figura 2



Distribución espacial de las tendencias para la precipitación en los últimos 50 años. Valores de tendencias (t) mas negativos (rojo) indican una tendencia mas acusada en el descenso de las precipitaciones.

➤ Discusión y conclusiones

Precipitación

Las tendencias negativas obtenidas a partir de los mapas climáticos en los últimos 50 años para Sierra Nevada indican que se ha producido un descenso de la precipitación (Figura 3a), coincidente con el descenso significativo observado en otros estudios tanto a nivel regional como local [2]. La tendencia decreciente observada puede estar relacionada con la tendencia positiva del índice NAO (Oscilación del Atlántico Norte), tal como apuntan otros trabajos [3].

El patrón espacial de estas tendencias (Figura 2) revela que las zonas más occidentales de Sierra Nevada son las que han sufrido una tendencia mayor a la disminución de la precipitación en los últimos 50 años. Este patrón puede deberse a que la precipitación mayoritaria tiene orígenes diferentes en la parte occidental y en la oriental. Las precipitaciones en la zona occidental proceden de grandes frentes que vienen del Atlántico. La frecuencia y carga de agua de estos frentes

está sometido al patrón periódico de la NAO. Por el contrario, la precipitación en la zona oriental procede de perturbaciones climáticas generadas en el Mediterráneo. Éstas parecen estar aumentando como consecuencia del calentamiento del mar.

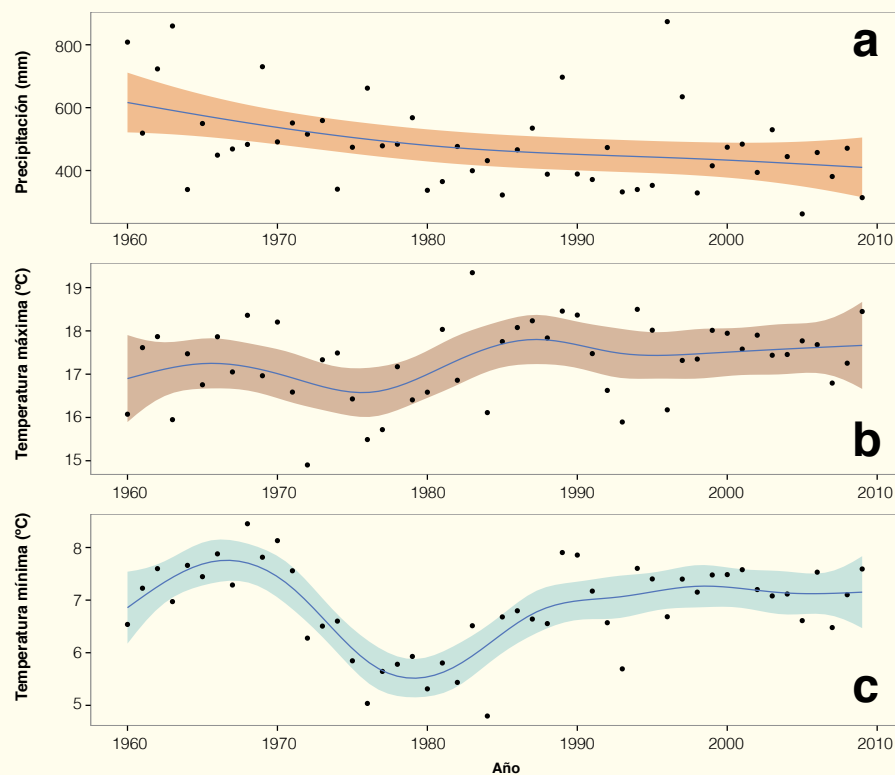
La interpretación de los resultados de la tendencia general de la precipitación ha de considerar la alta variabilidad de esta variable [10] así como la incertidumbre intrínseca a la hora de generar las interpolaciones espaciales [9]. Aunque algunos trabajos señalan la existencia de una tendencia general decreciente para el sur de la Península Ibérica [4], la precipitación presenta una alta variabilidad temporal, impidiendo vislumbrar una tendencia general definida [2].

Temperaturas

La tendencia positiva observada en la evolución de las temperaturas en los últimos 50 años en Sierra Nevada (Figura 3b y c) concuerda con el

patrón general observado a partir de diversos estudios, tanto regionales como a nivel de la Península Ibérica [5, 10], que indican un aumento significativo de las temperaturas en el siglo XX, sobre todo a partir de los años 70. Para Sierra Nevada se observaron tendencias significativas para las temperaturas máximas al igual que ocurre en otras regiones montañosas del sur de la Península Ibérica, donde además se ha constatado que el aumento de las temperaturas mínimas ha sido más suave y solamente significativo en las zonas bajas [2, 5]. Para las temperaturas mínimas no se encontraron tendencias significativas para todo el periodo analizado. Esto se puede explicar por el hecho de que se ha analizado la tendencia del periodo completo (1960-2010). En este sentido, diversos estudios han puesto de manifiesto que las temperaturas mínimas han sufrido un aumento a partir de los años 70 del pasado siglo, no apreciándose este aumento si se analiza la serie desde mediados del siglo pasado [8, 10].

Figura 3



Evolución de la precipitación (a) y de las temperaturas máxima (b) y mínima (c) durante el periodo 1960-2010 en Sierra Nevada. Los datos proceden de las simulaciones generadas para toda Sierra Nevada. Se muestran los valores medios y los intervalos de confianza para cada año.

1.2. El clima en Sierra Nevada: presente y futuro

Pérez-Luque, A.J.¹; Pérez-Pérez, R.¹; Aspizua, R.²; Muñoz, J.M.² y Bonet, F.J.¹

¹Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía, Universidad de Granada ²Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía

Resumen

Los valores obtenidos de las simulaciones de clima futuro predicen un aumento de las temperaturas máximas y mínimas anuales para final de siglo en Sierra Nevada, que varían entre 2 y 6 °C para las temperaturas máximas y entre 1 y 4 °C para las temperaturas mínimas. Estos valores coinciden con los observados en diferentes estudios tanto regionales como a nivel de la Península Ibérica. Para la precipitación, los modelos predicen una reducción de la misma, aunque hay que considerar la alta incertidumbre de las simulaciones para esta variable.

Los valores simulados por los modelos presentan una alta correlación con los valores reales registrados por las estaciones multiparamétricas del Observatorio del Cambio Global de Sierra Nevada distribuidas a lo largo del acusado gradiente ecológico y altitudinal del macizo montañoso.

> Objetivos y metodología

Considerando dos modelos climáticos globales (CGCM2 y ECHAM4) (ver IPCC) y dos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (Tabla 1) se elaboraron mapas regionalizados para Sierra Nevada de alta resolución espacial (100 m), para el período 2011-2100 con las variables precipitación anual, temperatura media anual de las máximas y temperatura media anual de las mínimas en cuatro modelos climáticos (CGCM2-A2, CGCM2-B2, ECHAM4-A2, ECHAM4-B2). Para cada variable se analizaron

las diferencias de los valores simulados para el conjunto de Sierra Nevada entre los años 2011 y 2100 en cada uno de los diferentes modelos climáticos utilizados.

Por otro lado, los resultados de las simulaciones a futuro para cada variable se contrastaron con los valores reales registrados por la extensa red de estaciones multiparamétricas que el Observatorio del Cambio Global de Sierra Nevada tiene distribuidas entre 600 y 3.100 msnm en

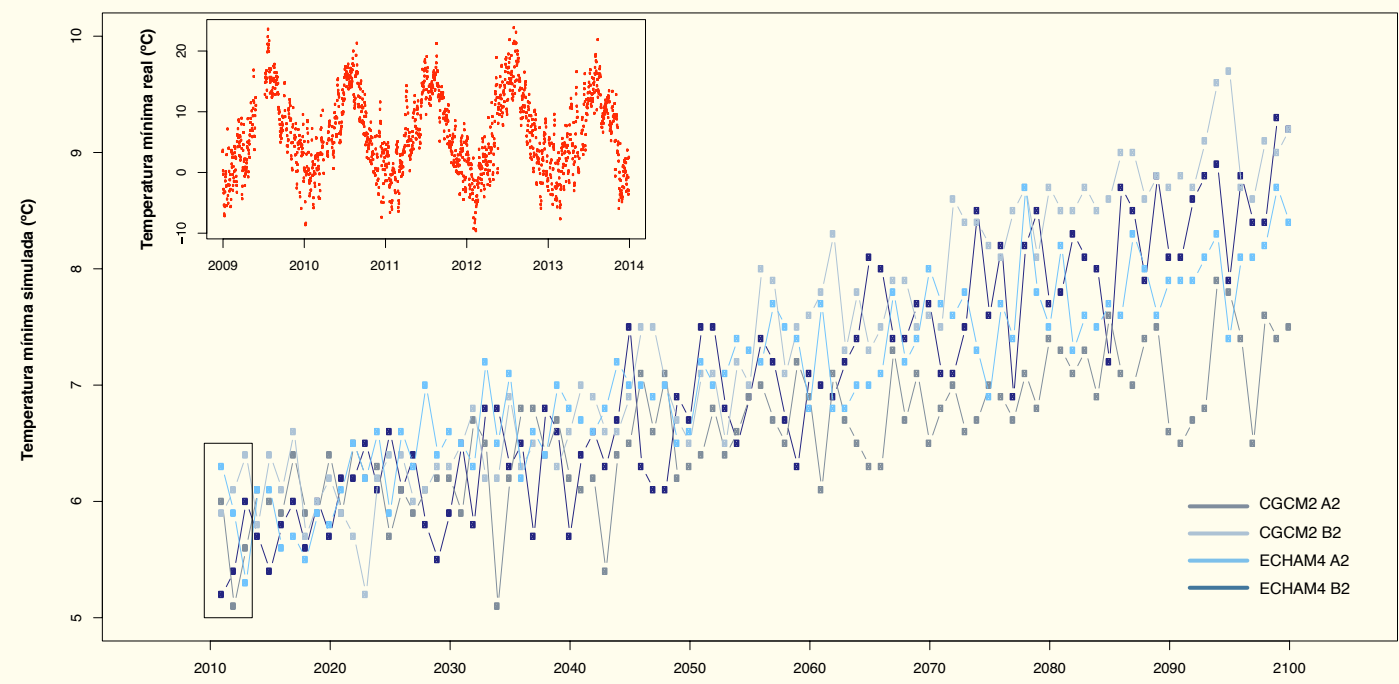
los principales ecosistemas de Sierra Nevada [6] (Figura 1). En concreto para cada variable (precipitación anual, media de las temperaturas máximas y media de las temperaturas mínimas) se analizaron las correlaciones entre los valores proporcionados por las simulaciones y los valores reales para el período 2011-2013. Para ello se utilizaron los valores simulados para cada uno de los píxeles que coinciden con la localización de las estaciones multiparamétricas.

Tabla 1

		Cambio de Temperatura (°C en 2090-2099 respecto 1980-1999)	
Escenario	Concentración CO ₂ (ppm)	Estimación óptima	Intervalo Probable
Ref. (2000)	365	0,6	0,3 - 0,9
B2	800	2,4	1,4 - 3,8
A2	1.250	3,4	2,0 - 5,4

Principales características de los escenarios de emisión A2 y B2 (Fuente IPCC).

Figura 1



Evolución de la temperatura media anual de las mínimas para la Estación Multiparamétrica de Cañar. Se muestran los valores simulados según los cuatro modelos climáticos considerados. En el marco superior se representan los valores de las temperaturas mínimas diarias registrados por la estación multiparamétrica para el período 2009-2014.

> Resultados

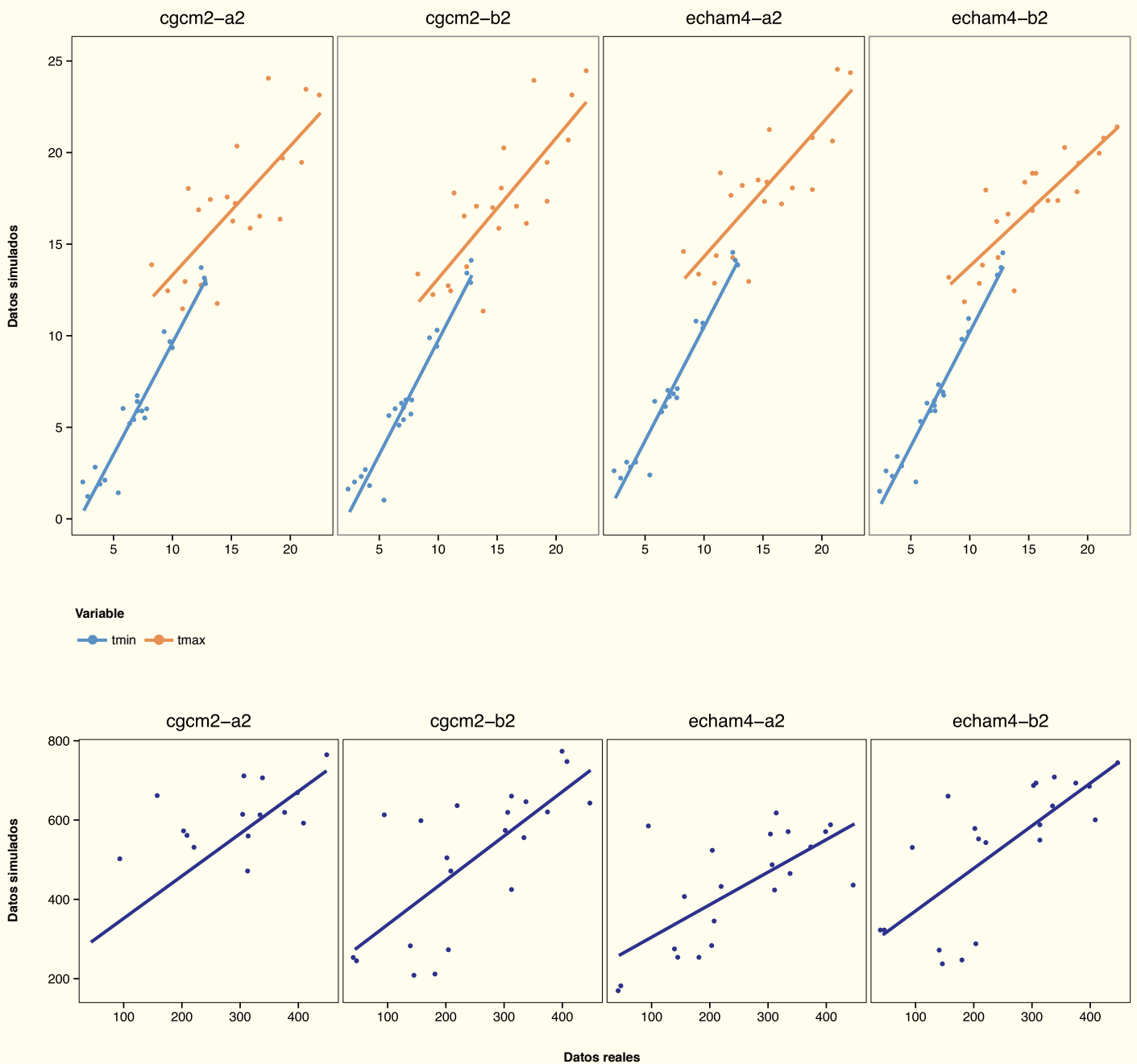
Los resultados de las simulaciones de clima para el futuro en Sierra Nevada según los cuatro escenarios climáticos muestran un aumento en las temperaturas y un descenso en la precipitación. Para las temperaturas máximas se espera un aumento que varía entre +2,56 °C y +6,22 °C en función del modelo y el escenario (Tabla 2). Para las temperaturas mínimas este aumento se espera que varíe entre +1,81°C y +4,38 °C.

Tabla 2

Variable	Modelo	Escenario	Diferencia 2100-2011
Precipitación	CGCM2	A2	-112,60 ± 44,14
	B2		52,32 ± 41,56
	ECHAM4	A2	-38,32 ± 31,42
	B2		-89,91 ± 31,31
Temperatura máxima	CGCM2	A2	6,22 ± 0,47
	B2		2,56 ± 0,21
	ECHAM4	A2	4,98 ± 0,68
	B2		3,36 ± 0,27
Temperatura mínima	CGCM2	A2	4,38 ± 0,83
	B2		1,81 ± 0,46
	ECHAM4	A2	3,79 ± 0,61
	B2		2,37 ± 0,39

Diferencia promedio de los valores climáticos simulados para el conjunto de Sierra Nevada entre los años 2011 y 2100, en cada uno de los diferentes modelos de circulación global y escenarios de emisiones. Se muestra la media y la desviación estándar. Precipitación en mm y temperaturas en °C.

Figura 2



Comparación de valores simulados con las proyecciones frente a valores registrados por las estaciones multiparamétricas para los años 2011-2013. Panel superior: media de las temperaturas máximas y media de las temperaturas mínimas; Panel inferior: precipitación anual. Se muestran las comparaciones para los cuatro escenarios.

La comparación de los valores reales registrados por las estaciones multiparamétricas con los simulados en los cuatro escenarios climáticos arroja unos valores de correlaciones altos para las variables de temperatura y más moderados para la precipitación (Tabla 3, Figura 2). En todos los casos, para el periodo de años evaluado (2011-2013), el escenario que mejor predice los valores reales en Sierra Nevada es el modelo ECHAM y escenario de emisión B2, ya que muestra una mayor correlación para las tres variables.

Tabla 3

Variable	Modelo	Escenario	R²
Precipitación	CGCM2	A2 B2	0,526 0,519
	ECHAM4	A2 B2	0,467 0,546
Temperatura máxima	CGCM2	A2 B2	0,573 0,651
	ECHAM4	A2 B2	0,628 0,710
Temperatura mínima	CGCM2	A2 B2	0,934 0,936
	ECHAM4	A2 B2	0,954 0,961

Resultados de las correlaciones entre las simulaciones climáticas y los valores reales para las estaciones multiparamétricas para el periodo 2011-2013. Se han incluido los datos de 7 estaciones, excluyendo la estación multiparamétrica de Veleta, por discontinuidad en la serie de datos.

> Discusión y conclusiones

Las simulaciones del clima para Sierra Nevada proyectan un aumento de las temperaturas máximas y mínimas, siendo los escenarios A2 los que presentan las proyecciones más severas. Esos resultados son similares a los obtenidos por simulaciones con modelos regionales para Sierra Nevada [7]. En este sentido, los aumentos de temperaturas mínimas y máximas que hemos obtenido para el escenario A2, están dentro del intervalo de valores ofrecido por proyecciones obtenidas con diferentes modelos para la Península Ibérica [8, 9, 10], que indican aumentos de hasta 6°C y 8°C a final de siglo para las medias anuales de las temperaturas mínimas y máximas respectivamente. Los valores simulados obtenidos con los mapas de clima futuro para Sierra Nevada, que apuntan un aumento de temperatura similar al de otros trabajos, nos permiten señalar que los mapas generados son consistentes con las tendencias potenciales estimadas para el sur de la Península Ibérica [8].

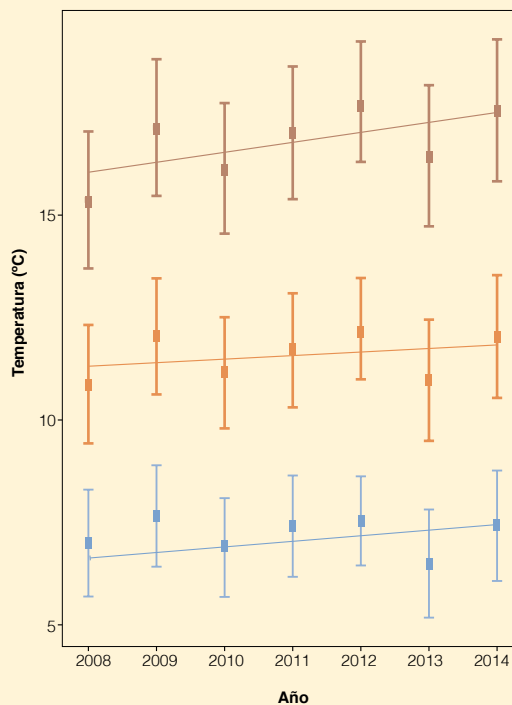
Por otro lado, se han observado altas correlaciones entre los valores predichos por las simulaciones y los valores reales recogidos por las estaciones multiparamétricas. Aunque solamente se han evaluado 3 años, los resultados ponen de manifiesto que las simulaciones proyectadas por los escenarios B2 son las más probables, ya que en todas las variables son las que tienen mayor correlación con los datos reales (Tabla 3). Los valores de correlación obtenidos ponen de manifiesto que para estos tres años las simulaciones predicen bien los valores de temperatura obtenidos independientemente de la elevación. Por otro lado, se observan valores de correlación mas bajos para la precipitación que para las temperaturas, apoyando la idea de que las simulaciones realizadas para la primera variable son menos fiables [8].

Respecto a las simulaciones obtenidas para la precipitación se encontró un patrón diferencial en función del modelo. Este hecho puede

explicarse por el alto grado de incertidumbre que contienen las simulaciones para la precipitación, debido tanto a las técnicas de regionalización espacial como a las técnicas de regionalización de dinámicas atmosféricas, tal como apuntan otros estudios en la Península Ibérica [9]. Esta incertidumbre se agrava sobre todo en zonas con altos gradientes topográficos como Sierra Nevada, por lo que las simulaciones obtenidas para la precipitación han de ser interpretadas con cautela. No obstante, se observa que los modelos ofrecen una reducción de la precipitación a final del siglo XXI. Este hecho se corrobora con lo observado por otros trabajos que también ponen de manifiesto una reducción de la precipitación en la mitad sur de la Península Ibérica aplicando diferentes modelos [8-10].

El Organismo Autónomo Parques Nacionales, a través de la Fundación Biodiversidad, ha financiado la instalación y mantenimiento de 8 estaciones multiparamétricas distribuidas en diferentes pisos bioclimáticos y orientaciones dentro del Parque Nacional y Natural de Sierra Nevada, en el marco del Programa de Seguimiento del Cambio Global en Parques Nacionales (<http://www.magrama.gob.es/es/red-parques-nacionales/red-seguimiento/cambio-global.aspx>). La gráfica muestra las temperaturas medias, medias de las máximas diarias y medias de las mínimas diarias registradas por estas estaciones entre los años 2008 y 2014.

 Temperatura Media
 Temperatura Máxima
 Temperatura Mínima



Estación multiparamétrica PSN₃ (Camarate II-Piedra de los Soldados), situada a 2.155 msnm.

Bibliografía

› Más referencias en http://refbase.iecolab.es/ref_dossier_resultados.html

1.1 Evolución del clima en los últimos 50 años en Sierra Nevada

- [1] Benito, B.M.; Pérez-Pérez, R. & Reyes Muñoz, P.S. (2012) *Simulaciones climáticas*. Pp: 30-31. En: Aspizua, R.; Barea-Azcón, J.M.; Bonet, F.J.; Pérez-Luque, A.J.; Zamora, R. (coords.). Observatorio de Cambio Global Sierra Nevada: metodologías de seguimiento. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía.
- [2] Ruiz Sinoga, J.D.; García Marín, R.; Martínez Murillo, J.F. & Gabarrón Galeote, M.A. (2011). Precipitation dynamics in southern Spain: trends and cycles. *International Journal of Climatology*, 31 (15): 2281–2289.
- [3] Rodrigo, F.S. & Trigo, R.M. (2007). Trends in daily rainfall in the Iberian Peninsula from 1951 to 2002. *International Journal of Climatology*, 27 (4): 513–529.
- [4] Rodrigo, F.S.; Esteban-Parra, M.J.; Pozo-Vázquez, D. & Castro-Díez, Y. (1999). A 500-year precipitation record in Southern Spain. *International Journal of Climatology*, 19 (11): 1233–1253.
- [5] Galán, E.; Cañada, R.; Fernández, F.; & Cervera, B. (2001). *Annual temperature evolution in the southern plateau of Spain from the construction of regional climatic time series*. Pp 119-132. En: Brunet India, M. & López-Bonillo, D. (Eds.) Detecting and Modelling Regional Climate Change. Springer-Verlag Berlin.

1.2 El clima en Sierra Nevada: presente y futuro

- [6] Muñoz, J.M. & Aspizua, R. (2012). *Red de estaciones meteorológicas multiparamétricas*. Pp: 28-30. En: Aspizua, R.; Barea-Azcón, J.M.; Bonet, F.J.; Pérez-Luque, A.J.; Zamora, R. (coords.). Observatorio de Cambio Global Sierra Nevada: metodologías de seguimiento. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía.
- [7] Benito, B.; Lorite, J. & Peñas, J. (2011). Simulating potential effects of climatic warming on altitudinal patterns of key species in Mediterranean-alpine ecosystems. *Climatic Change*, 108 (3): 471–483.
- [8] de Castro, M.; Martín-Vide, J. & Alonso, S. (2005). *El clima de España: pasado, presente y escenarios de clima para el siglo XXI*. Pp: 1-64. En: Moreno-Rodríguez, J.M. (ed.) Principales conclusiones de la evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- [9] Brunet, M.; Casado, M.; Castro, M.; Galán, P.; López, J.; Martín, J.; Pastor, A.; Petisco, E.; Ramos, P.; Ribalaygua, J.; Rodríguez, E.; Sanz, I. & Torres, L. (2008). *Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España*. Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Madrid.
- [10] Pérez, F.F. & Boscolo, R. (Eds.) (2010). *Clima en España: pasado, presente y futuro. Informe de Evaluación del Cambio Climático Regional*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino: Ministerio de Ciencia e Innovación. Madrid.



Caracterización de la cubierta de nieve y del régimen térmico en las cumbres de Sierra Nevada

La cubierta de nieve es la capa de agua en estado sólido que se acumula sobre el terreno procedente de la precipitación en forma de nieve. Su estructura y dinámica interna puede cambiar a lo largo del año, pasando de estado líquido a sólido, y viceversa, en función de las condiciones climáticas. La cubierta de nieve tiene una estructura compleja, ya que su matriz sólida está formada por agua helada. El agua obtenida tras el proceso de fusión puede percolar al terreno, infiltrarse en el mismo o bien escurrir hasta los cauces de los ríos. Gracias a las características anteriores, la nieve es un elemento clave en los ecosistemas de las montañas. Su capacidad de almacenar agua, por ejemplo, explica su papel

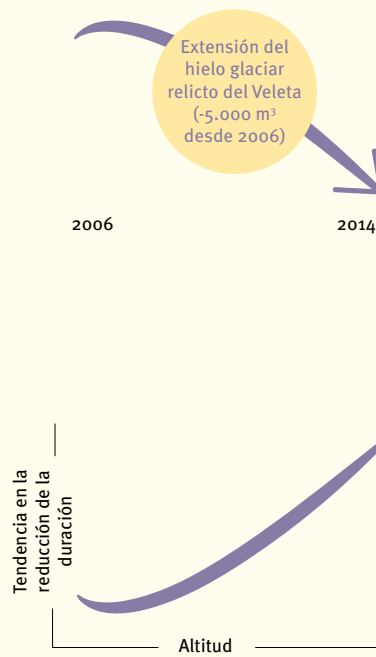
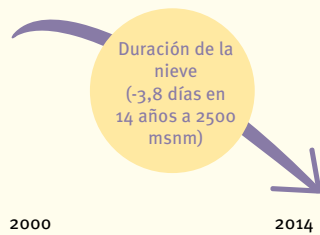
en el ciclo hidrológico. Por otro lado, su peso y su conductividad térmica explican su papel en muchos procesos ecológicos (suministro de agua, amortiguación de los efectos nocivos del frío, etc.). Esto hace que, en los lugares donde es frecuente la nieve, el patrón hidrológico sea diferente a los sitios donde no está presente. Además, en estos lugares, la nieve condiciona la distribución y estructura de las comunidades vegetales.

La cubierta de nieve es pues un elemento físico fundamental para entender el funcionamiento de multitud de procesos ecológicos en los ecosistemas de montaña.

Este papel se hace aún más importante en un contexto de cambio global al que nos enfrentamos. Los escenarios de cambio climático predicen cambios importantes en la abundancia y distribución de las precipitaciones. Estos cambios también afectarán al estado y comportamiento de la cubierta de nieve. Y a su vez, es previsible que estas alteraciones en el manto de nieve provoquen cambios de intensidad variable en los ecosistemas de las zonas de montaña. Sierra Nevada, debido a su gran altitud (3.482 msnm), es la montaña del sur de la Península donde la cubierta de nieve está presente durante más tiempo. El agua que contiene contribuye al funcionamiento de bosques, matorrales,

Gran heterogeneidad temporal y espacial de la capa de nieve y de la temperatura

En un año puede haber cuatro veces más profundidad que en otro.



El permafrost

no se puede mantener en Sierra Nevada con las condiciones climáticas actuales.

La reducción en la duración de la nieve

es más intensa en mayo y en octubre.

Resumen gráfico de los principales resultados descritos en el presente capítulo. Se muestra la evolución de la duración de la nieve y de la extensión del hielo glaciar en el Veleta. Asimismo mostramos la variación de la tendencia en la reducción de la cubierta de nieve con respecto a la elevación.

ecosistemas acuáticos y también a la agricultura y a otras actividades humanas (actividades recreativas, ganadería, etc.) tanto en la Sierra como en las comarcas del entorno.

Desde el Observatorio del Cambio Global de Sierra Nevada se ha puesto en marcha un sistema integrado y multiescalar de seguimiento de las características de la cubierta de nieve. La escala más detallada consiste en la realización de muestreos *in situ* para evaluar las características físicas de la nieve y su capacidad de almacenar agua. Estos datos puntuales son utilizados en combinación con otras técnicas (fotografías a pie de campo para evaluar cambios en la superficie) para calibrar y validar el modelo hidrológico WiMMed (*Watershed Integrated Model in Mediterranean Environments*).

También a esta escala de detalle se realizan mediciones periódicas de la temperatura del suelo y substrato a varias profundidades con objeto de evaluar la probabilidad de existencia de *permafrost* en Sierra Nevada. Por último, se lleva a cabo un seguimiento extensivo de la cubierta de nieve mediante las imágenes de satélite suministradas por el sensor MODIS.

Los datos obtenidos mediante los pozos de nieve durante los años 2011-2013 arrojan información muy interesante sobre el comportamiento de la capa de nieve. Lo más destacable es la gran heterogeneidad espacial y temporal de la cubierta de nieve. La profundidad de la nieve, por ejemplo, puede cuadruplicarse entre dos años consecutivos dependiendo de las condiciones climáticas locales. La información generada en los pozos de nieve ha sido utilizada para validar el modelo hidrológico WiMMed que también simula la extensión y cantidad de agua acumulada en la nieve.

Gracias al seguimiento de la temperatura del suelo en la zona de cumbres se ha evaluado la capacidad de Sierra Nevada de albergar *permafrost*. En la actualidad, solo en algunos lugares concretos el tiempo durante el cual el suelo permanece congelado permite el mantenimiento de los procesos geomorfológicos de alta montaña (p. ej.: gelifluxión). Además, se observa una progresiva pérdida de hielo glaciar relicto y *permafrost* del Corral del Veleta.

El análisis de la serie temporal de MODIS desde 2000 hasta 2014 arroja datos interesantes sobre

las tendencias en la duración, fecha de inicio de la innivación y último día con nieve a escala de píxel de 500 m en toda Sierra Nevada. Se observa una clara tendencia hacia la reducción de la duración de la presencia de nieve. Esta tendencia es mayor conforme ascendemos en altitud. Asimismo, se concentra en los meses de inicio (octubre) y fin de la temporada de nieve (mayo). Aunque estos resultados son congruentes con los ya descritos para las tendencias de precipitación (capítulo 1), no pueden considerarse concluyentes ya que el periodo analizado no es lo suficientemente largo.

Los resultados obtenidos ayudan a comprender la estructura y dinámica de la capa de nieve en Sierra Nevada. También contribuyen a su simulación y a evaluar su efecto en la provisión de servicios ecosistémicos.

2.1. Seguimiento de las características físicas de la capa de nieve

Algarra, J.A.¹ y Herrero, J.²

¹Agencia de Medio Ambiente y Agua ² Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía, Universidad de Granada

Resumen

La presencia, distribución y duración de la capa de nieve en Sierra Nevada es una de las características físicas que hacen de este macizo un enclave tan peculiar, además de darle su nombre. Es el recurso que sirve de base a actividades económicas como el esquí; es reserva de agua, dilatada en el tiempo, que alivia la escasez de los periodos secos estivales y amortigua la torrencialidad mediterránea; es modulador de ecosistemas que albergan flora y fauna exclusivas y/o relicticas de épocas más frías. El conocimiento preciso de sus propiedades, de su dinámica y de su vulnerabilidad ante cambios en el clima es fundamental para la gestión y planificación de todos los servicios ecosistémicos a los que afecta [1]. En este trabajo se combinan campañas puntuales de seguimiento *in situ* de las propiedades del manto de nieve, estaciones fijas de seguimiento de los valores meteorológicos que determinan su comportamiento, una estación fotográfica para el estudio de la evolución en detalle de la superficie cubierta y aplicación de todo ello en un modelado físico de la nieve con el programa WiMMed [2] que permite hacer pronósticos de su comportamiento ante predicciones meteorológicas o ante hipotéticos escenarios pasados o futuros, y su efecto en la hidrología de los ríos de Sierra Nevada.

> Objetivos y metodología

El objetivo es ahondar en el conocimiento, tanto a escala de detalle como a escala de toda Sierra Nevada, de las propiedades físicas de la nieve y de su distribución y dinámica, para comprender mejor los efectos reales de la nieve dentro del ciclo hidrológico y sobre los ecosistemas. Asimismo se pretende poner a punto las herramientas que permitan pronosticar la

evolución de la capa de nieve ante escenarios de cambio climático o eventos meteorológicos (sequías, frentes fríos, etc.). Para lograr este objetivo se han combinado diversas metodologías de seguimiento a partir de estaciones meteorológicas fijas completas, de estaciones de vídeo seguimiento y de mediciones sistemáticas directas sobre la nieve. Este seguimiento

se ha completado con el uso de un modelo de simulación de la nieve desde una aproximación física (WiMMed)[2], que permite abordar la parte de predicción apoyándose de manera muy importante en los trabajos de seguimiento *in situ* descritos.

> Resultados

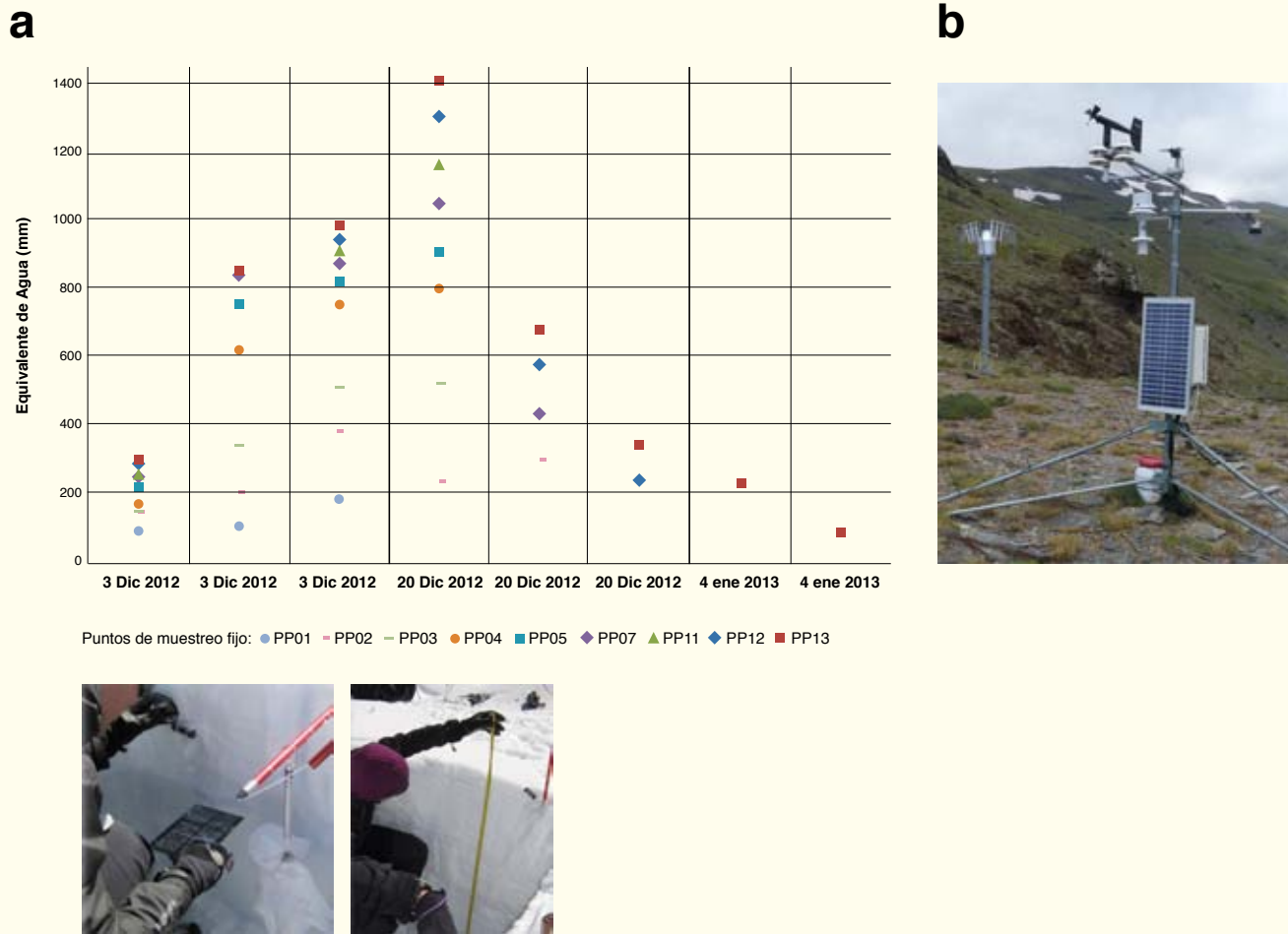
Los seguimientos *in situ* han permitido constatar la gran variabilidad espacial y temporal de la capa de nieve en Sierra Nevada. A lo largo de los años 2008-2013 se han registrado sistemáticamente los valores de densidad, equivalente de agua, espesor, número de capas y propiedades particulares de las mismas, como dureza, temperatura y tamaño de grano, principalmente en las cuencas de los ríos Genil y Guadalfeo. Esto

permite no sólo estimar la cantidad de nieve almacenada, sino también valorar la estabilidad del manto y el riesgo de aludes en las zonas más inestables.

Es la primera vez que se obtienen datos sistemáticos *in situ* de las propiedades de la nieve en Sierra Nevada, que en este proyecto, se han extendido a ambas vertientes de la Sierra. Dado

que el periodo de tiempo durante el que se vienen llevando a cabo estas medidas aún es corto y dado que se carece de antecedentes de medidas similares, no es posible aún obtener tendencias del comportamiento de la nieve. Estas medidas suponen, sin embargo, un punto de referencia muy importante para cuantificar la evolución temporal de las propiedades de la nieve.

Figura 1



a) Comparativa de equivalentes de agua (mm) obtenidos en las mediciones en puntos fijos para ocho muestreos (desde el 03/12/2012 hasta 04/01/2013) en la misma cuenca (río Genil). Destaca la elevada variabilidad por fecha y por punto de muestreo. b) A la derecha, una de las estaciones meteorológicas completas instaladas en la zona de nieve en el valle del río Trevélez.

Gracias a los seguimientos fotográficos se han obtenido mapas detallados de nieve de la parte alta de la cuenca del río Trevélez, con los que estudiar la dinámica de la nieve y su distribución en el espacio según la altitud y la orientación. Se ha encontrado que gracias a la orientación sureste de la ladera observada, la nieve mantiene una distribución bastante homogénea, creciente con la altura, que se ha

conseguido simular satisfactoriamente con WiMMed [3]. Se ha desarrollado una técnica de asimilación directa de los datos de superficie cubierta de nieve observados por la fotografía en el modelo, que ayudan a mejorar la predicción de caudales en el río Trevélez.

Las estaciones meteorológicas instaladas han permitido observar ciertas condiciones

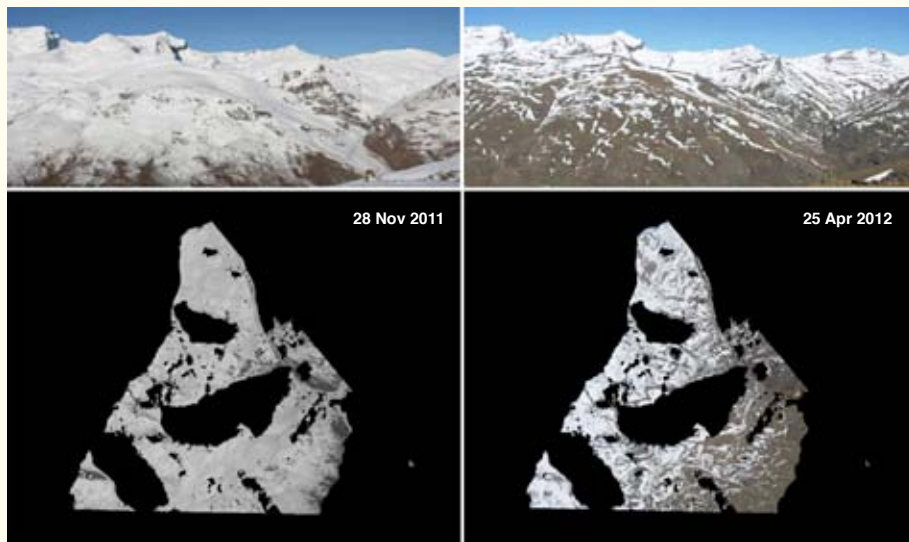
ambientales en las zonas altas de Sierra Nevada hasta ahora no monitorizadas sistemáticamente, y medir los flujos de energía que determinan el comportamiento de la capa de nieve, como es el caso de las radiaciones de onda corta y de onda larga [4].

Figura 2

a



b



a) Cámara de seguimiento de la nieve en el valle del río Trevélez, b) dos imágenes de dos fechas distintas restituídas y georreferenciadas.

➤ Discusión y conclusiones

Para el seguimiento *in situ* se han seguido las recomendaciones estándar descritas en [5] pero se han tenido que adaptar a las peculiaridades de la nieve en Sierra Nevada. Entre éstas destacan unos espesores pequeños, salvo en aquellas zonas muy concretas de acumulación de nieve; y una variabilidad muy grande en el tiempo y en el espacio, con gran presencia de manchas de nieve y diferencia entre laderas contiguas con distinta orientación. Cabe señalar la excepcional acumulación de nieve durante la campaña 2010-2011 en comparación con el resto de años. No es extraño que entre dos años consecutivos la cantidad de nieve se pueda cuadruplicar.

En este lugar, la nieve está sometida a una climatología de carácter mediterráneo que le

confiere un patrón distintivo. El comportamiento especial de la nieve está más relacionado con regiones donde la baja latitud y la elevación permiten la aparición de la nieve en entornos semiáridos o mediterráneos, como ciertas partes de los Andes centrales, el Atlas o las montañas del suroeste de los Estados Unidos. Una característica común de estos lugares es que la nieve, además de sus importantes efectos sobre los sistemas bióticos, se convierte en un condicionante básico de la distribución en el tiempo del recurso agua, especialmente escaso. La planificación en el uso del agua para riego y consumo no puede hacerse con efectividad sin un conocimiento del desarrollo del manto de nieve y de los pronósticos de su evolución a corto, medio y largo plazo.

Estos trabajos de monitorización de las características de la capa de nieve son pioneros en Sierra Nevada y de importancia bien conocida en diversos aspectos, que van desde el aprovechamiento hídrico o el turismo hasta el natural. Su valor se incrementará con el tiempo si se consiguen mantener con el seguimiento iniciado, en la medida en la que permitirán observar cambios y tendencias. Dada la heterogeneidad de la nieve comprobada en estas campañas, es interesante extender las campañas a las otras cuencas más orientales, Adra, Andarax y Fardes, donde la nieve está menos presente y puede verse más afectada por cambios en la temperatura o en el régimen de precipitaciones.

2.2. Degradación de hielos glaciares relictos y permafrost en Sierra Nevada

Gómez-Ortíz, A.¹; Salvador-Franch, F.¹; Oliva-Franganillo, M.² y Salvà-Catarineu, M.¹

¹ Universidad de Barcelona ² Universidad de Lisboa

Resumen

Los restos de hielos glaciares relictos y *permafrost* que quedan bajo paquetes de clastos en el Corral del Veleta, en el tercio oriental de su base, son herencia de la Pequeña Edad del Hielo. Estos cuerpos helados proceden del pequeño foco glaciar que colmó el cuenco del referido Corral y sobre el cual la documentación escrita, desde el siglo XVII hasta mediados del siglo XX, ha venido dando información sobre su evolución. En la actualidad se encuentran en continuado proceso de degradación.

► Objetivos y metodología

El objetivo central que interesa es analizar y explicar el proceso de degradación de los hielos glaciares relictos y *permafrost* del Corral del Veleta (3.150 msnm) [6]. La metodología y técnicas empleadas han consistido en la monitorización y control del comportamiento de los parámetros que intervienen en el referido proceso, a saber: a) manto nival en verano, a partir de fotografías

digitales convenientemente corregidas.

b) movimiento del manto de clastos, a partir de técnicas geomáticas.

c) temperatura de la capa activa, a partir de sensores térmicos tipo *datalogger*.

d) estado físico de los cuerpos helados, a partir de prospecciones geoelectricas (tomografía).

Los controles realizados se iniciaron en 2001

en una zona de muestreo que corresponde al incipiente glaciar rocoso instalado junto a la lagunilla del Corral, de superficie 3.815 m². Los parámetros a, b y c se han controlado anualmente durante la última semana de agosto. El control del parámetro d se realizó en agosto de 1999 y 2009.

► Resultados

Las metodologías de seguimiento y controles que se aplican para evaluar el estado físico de los hielos glaciares relictos y *permafrost* arrojan datos concluyentes de su progresiva degradación. En tal sentido, resulta significativa la información que refleja la Tabla 1 para el periodo 2006-2013. A lo largo de éste la pérdida de masa helada subyacente podría arrojar un volumen de 5.001,3 m³, la mayoría en forma de agua [8]. Esta cantidad se reparte de forma desigual en el tiempo pero resulta muy relacionada con los colapsos del manto detrítico que la recubre, que arrojan un hundimiento de 1,311 m (Tabla 1). La falta de información de los años 2009-2010, 2010-2011 y 2012-2013, se debe a la extensión y espesor que presentaba la nieve en el suelo en agosto, que impidió obtener datos de control.

Tabla 1

Periodo	Colapso/hundimiento medio (m)	Pérdida de hielo/agua congelada (m ³)
2006-2007	-0,401	1.529,82
2007-2008	-0,391	1.491,6
2008-2009	-0,240	915,6
2009-2010	sd.	sd.
2010-2011	sd.	sd.
2011-2012	-0,279	1.064,3
2012-2013	sd.	sd.
Totales	-1,311	5.001,3

Datos de colapso y pérdida de agua por año. *sd.*: sin datos por recubrimiento nival durante los controles.

En cuanto al reparto de los hielos glaciares relictos y *permafrost* internos en la superficie monitorizada (3.815 m²) la tomografía eléctrica realizada en 2009 (Figura 1) indica que el techo

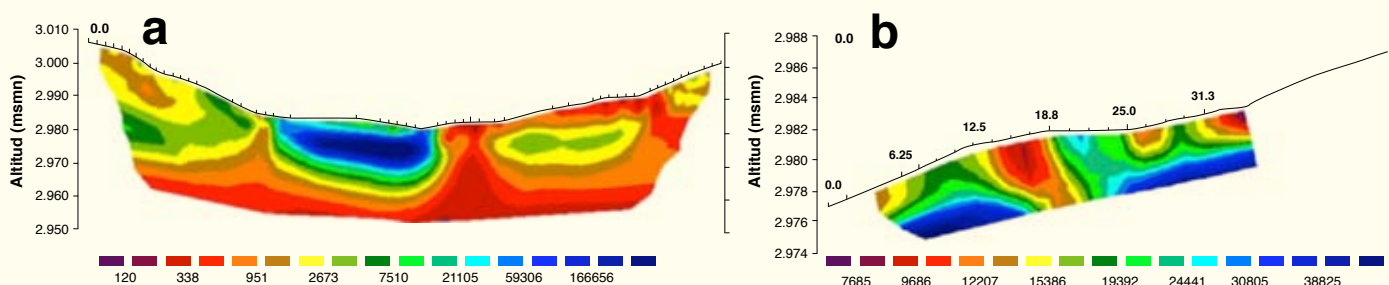
de estos cuerpos helados se dispone a partir de los -2 m y se distribuye irregularmente en bolsas compartimentadas, tal como indican los valores de máximas resistividades, a diferencia

de lo que se detectó en el registro de 1999 que entonces conformaban paquetes continuos.

Figura 1



Sector oriental de la base del Coral del Veleta. Área de estudio.



Tomografía eléctrica (realizada en agosto de 2009 por J. Galindo Zaldivar).
a. Sección vertical del segmento a.
b. Sección vertical del segmento b.
Las tonalidades azules corresponden a las mayores resistividades (cuerpos helados).

➤ Discusión y conclusiones

La interpretación que se hace del proceso de degradación de los hielos glaciares relictos y *permafrost* del Corral del Veleta debe ser resultado de la sucesión de procesos físicos en cascada, iniciados a partir de la radiación externa que incide en el suelo y funde la nieve. La eliminación progresiva de ella en verano propicia que la energía externa penetre progresivamente en la capa activa del suelo generando temperaturas positivas en todo su perfil logrando alcanzar el techo de los hielos glaciares relictos y *permafrost* que degrada y funde. En todo este proceso encadenado también la circulación de las aguas

de fusión desempeñan un cometido muy destacado en la transmisión de calor. De esta manera se explica la subsidencia y reajuste continuado que experimenta todo el paquete clástico, así como la fusión del techo helado en el que se asienta [7]. La magnitud de los colapsos y la pérdida de hielo glaciar y *permafrost* es siempre mayor en años en los que la nieve desaparece tempranamente, como ocurrió durante el periodo 2006-2007. Y resultan menores o nulos cuando la nieve en el suelo aún perdura a finales del verano, como sucedió de manera muy acusada durante los años 2009-2010, 2010-

2011, en los que las temperaturas positivas no lograron alcanzar el techo del hielo glaciar relicto y *permafrost*. En tal sentido el registro de 2011-2012, que ofrece valores de -0,279 m de colapso y 1.064,3 m³ de pérdida de cuerpos helados, refleja muy bien estos hechos, si se tiene en cuenta que corresponden a un tiempo de 36 meses (desde agosto de 2009 hasta agosto de 2012). Todos estos procesos físicos descritos vienen a indicar que es la permanencia de la nieve (y su espesor) en verano quien controla el ritmo y la magnitud de la degradación del hielo glaciar relicto y *permafrost* [8].

2.3. Régimen térmico del suelo

Salvador-Franch, F.¹; Oliva-Franganillo, M.²; Salvá-Catarineu, M.¹ y Gómez-Ortiz, A.¹

¹ Universidad de Barcelona ² Universidad de Lisboa

Resumen

El seguimiento de la evolución de la temperatura del suelo en distintos puntos de Sierra Nevada y a distintas profundidades contribuye a comprender mejor la dinámica del suelo helado permanente o estacional. En la actualidad se constata una degradación en las masas heladas residuales existentes en el Corral del Veleta. También se evidencia la inexistencia actual de condiciones de *permafrost* en la línea de cumbres. Por último se observa un patrón anual en el comportamiento de la temperatura del suelo, condicionado por la presencia/ausencia de nieve.

Objetivos y metodología

La observación de las características térmicas del suelo se inició en Sierra Nevada como método de detección y seguimiento del suelo helado permanente (*permafrost*) y como apoyo para el mejor conocimiento de la morfodinámica periglaciaria actual, para lo cual se instrumentaron diversos enclaves morfotopográficos contrastados del sector más elevado de Sierra

Nevada [9], tal como se indica en la Tabla 1. Esta línea de investigación recibió un impulso decisivo durante el desarrollo del proyecto PACE (*Permafrost and Climate in Europe, 2008-2010*), en el que Sierra Nevada constituyó un enclave muy significativo al ser el punto de observación más meridional de un largo transecto que llegaba hasta Svalbard (Noruega). Para el control

térmico del aire y del suelo se han usado distintas generaciones de *dataloggers* de alimentación autónoma (TinyTalk II, de Gemini; UTL 1 y 2, de Geotest; Hobo U12 y Pendant, de Onset; iButton) con capacidad para el almacenamiento de datos durante 1 a 3 años, con frecuencias de medición entre 4 y 1 h [9].

Tabla 1

Lugar	Altitud	Vertiente	Observaciones preliminares	Serie continua	Niveles de muestreo
Albergue Universitario	2.510	N	---	2008-en curso	aire / suelo: -5, -20, -50, -80 cm
San Juan	2.864	N	---	2003-2012	suelo: -2, -10, -20, -50, -100 cm
Corral del Veleta	3.107	N	1997-1999	1999-en curso	suelo: -5, -20, -50, -100, -150 cm
Collado de los Machos	3.297	cresta	1999-2000	2003-en curso	suelo: -5, -20, -50, -80 cm
Picacho del Veleta	3.380	cresta	2000-2002	2002-en curso	aire / suelo: 11 niveles , entre -20 cm y -60 m
Pandero del Mulhacén	3.200	S	1999-2000	---	suelo: -5, -10, -50 cm
Río Seco	3.105	S	---	2006-2012	suelo: -2, -10, -20, -50, -100 cm

Síntesis de los lugares, series obtenidas y niveles de observación térmica.

Resultados

El seguimiento térmico realizado ha contribuido a determinar las causas de la degradación de las masas heladas y *permafrost* residuales existentes en el Corral del Veleta, así como la dinámica del glaciar rocoso suprayacente [10,11]. Por otro lado, se ha comprobado la inexistencia actual de condiciones de *permafrost* sobre sustrato rocoso, formación superficial y suelo en sector de cumbres. En los fondos de valle de los antiguos circos glaciares de San Juan y Río Seco se ha

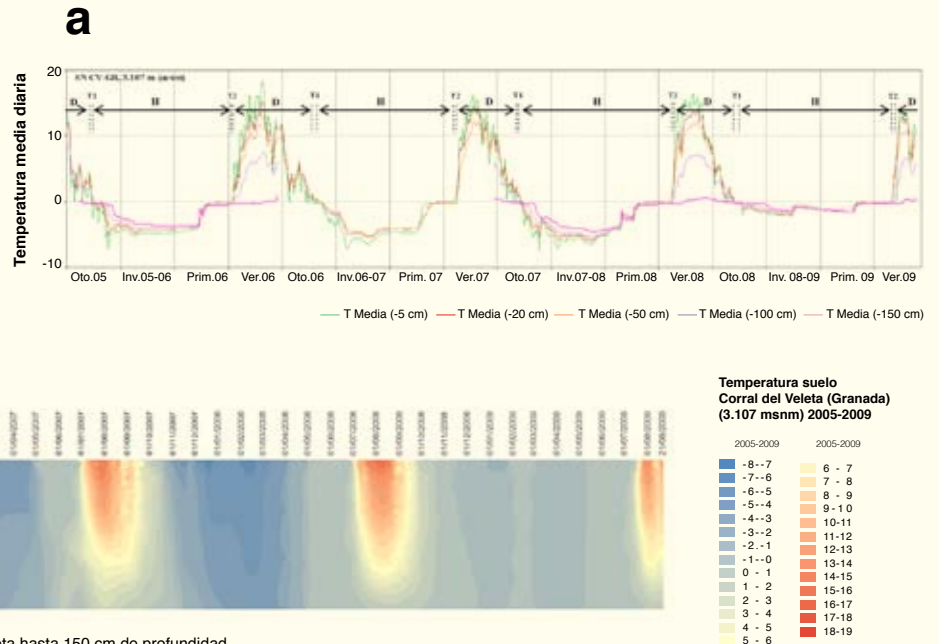
relacionado el dinamismo actual de los lóbulos de gelifluxión con sus condicionantes térmicas precisas [12]. En el collado de los Machos en cambio, se ha constatado la incapacidad de las condiciones térmicas actuales para mantener el dinamismo de las macrofiguras geométricas allí existentes [13]. En todos los casos se ha detectado un claro patrón anual de comportamiento del régimen térmico del suelo, claramente condicionado por la presencia/ausencia de nieve,

con prolongados periodos de engelamiento (H), más breves de deshielo (D) y otros muy cortos de transición con ciclos de hielo-deshielo (T1, T2) entre los dos primeros (Figura 1) [11]. Destacan también los datos obtenidos en relación a la drástica reducción del número de ciclos de hielo-deshielo, de la amplitud térmica y de los valores térmicos extremos que afectan al suelo en comparación con los registrados en el aire.

➤ Discusión y conclusiones

Los trabajos sobre termometría en las cumbres de Sierra Nevada constatan el interés del seguimiento térmico del aire y del suelo, y de la obtención de series suficientemente prolongadas, para entender de forma más precisa el funcionamiento y dinámica morfológica actual de los medios de alta montaña, así como su relación directa con el comportamiento del manto nival, del máximo interés ante la posibilidad de su disminución o fusión precoz por causa del proceso de cambio o variabilidad climática actual.

Figura 1



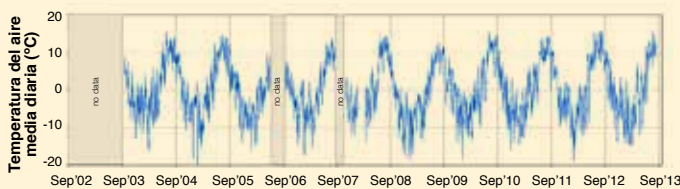
Ejemplo de comportamiento térmico del suelo en el Corral del Veleta hasta 150 cm de profundidad.

Termometría en el sustrato del Picacho del Veleta

La dinámica geomorfológica imperante en las cumbres nevadenses está controlada por la termometría del suelo, que muestra un régimen térmico característico del ambiente periglacial con suelo estacionalmente helado, sin presencia de *permafrost*.

En la actualidad, en Sierra Nevada sólo se han registrado condiciones térmicas de *permafrost* en el seno de los circos septentrionales más elevados, particularmente en el Corral del Veleta. Desde el año 2000 se controlan las condiciones térmicas en el sustrato y en el aire del Picacho del Veleta. Para el sustrato se han tomado datos de los primeros 60 m con termorregistradores a intervalos de 2 h a diferentes profundidades (0,2; 0,6; 0,8; 1,2; 2,6; 4; 7; 10; 13; 15; 20 y 60 m.), mientras que para el aire se ha hecho un seguimiento de la temperatura en un mástil próximo situado en la cima del Veleta (3.398 m)(Figura 1).

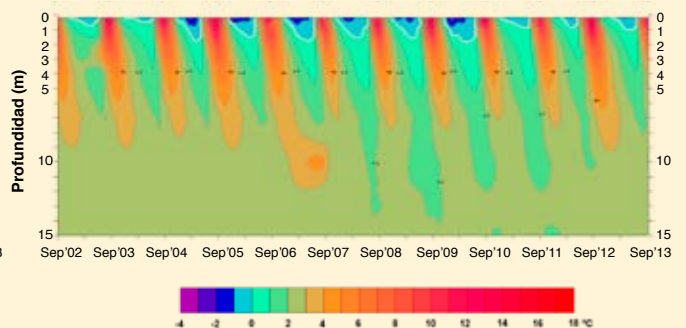
Figura 1



Evolución de las temperaturas del aire entre septiembre de 2002 y agosto de 2013.

Los resultados (agosto de 2002 – agosto de 2013) muestran temperaturas medias en el interior del roquedo que se estabilizan en torno a 2,5 °C en profundidad [14]. Los datos ponen de manifiesto una alternancia entre una estación fría en la que el sustrato permanece congelado por encima de 0,6 a 2 m de profundidad y una estación cálida donde los valores son ampliamente positivos (Figura 2). En el periodo estudiado la temperatura media del aire en el Veleta se ha incrementado en 0,12 °C, mientras que en el sustrato las temperaturas han seguido tendencias divergentes. La difusividad térmica del roquedo se ha cuantificado en $7,05 \pm 0,03 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, lo que implica que la señal climática externa llega con un desfase de 8,5 años al sensor situado a 60 m de profundidad.

Figura 2



Evolución de las temperaturas del sustrato entre septiembre de 2002 y agosto de 2013.

2.4. Análisis de tendencias (2000-2014) en la cubierta de nieve mediante satélite (sensor MODIS)

Bonet, F.J.; Pérez-Luque, A.J. y Pérez-Pérez, R.

Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía, Universidad de Granada

Resumen

El sensor MODIS alojado en el satélite Terra de la NASA suministra información de la cubierta de nieve desde el año 2000 hasta la actualidad. Se ha analizado la serie temporal completa del producto MOD10A2 para Sierra Nevada. Este producto muestra la superficie máxima ocupada por la nieve en periodos de 8 días. Los resultados arrojan tendencias negativas en la duración de la nieve en el 79,05% de los píxeles de Sierra Nevada. También hay una tendencia hacia el retraso en la fecha de inicio de la innivación en el 68,03% de los píxeles. Asimismo el 80,72% muestran tendencia a un adelanto en la fecha de retirada de nieve. Estas tendencias son más evidentes conforme se sube en altura.

► Objetivos y metodología

El objetivo de este trabajo es analizar los cambios que han ocurrido en la cubierta de nieve de Sierra Nevada desde 2000 hasta 2014, usando para ello la información suministrada por el sensor MODIS, alojado en el satélite Terra de la NASA. La cubierta de nieve es un elemento paisajístico de gran importancia en Sierra Nevada. Su estructura y dinámica condiciona en buena medida la disponibilidad de agua tanto para los cauces como para los ecosistemas de la alta montaña. Es también responsable de la estructura de la vegetación en ambientes alpinos.

La metodología seguida se basa en la creación de un flujo de trabajo que procesa automáticamente todas las imágenes del producto MOD10A2 (máxima extensión de la nieve durante 8 días) de MODIS [15], para generar indicadores de la estructura de la cubierta de nieve (SCD: Duración de la presencia de nieve por año hidrológico; SCOD: Fecha de inicio de la presencia de nieve por año hidrológico; SCMD: Último día de presencia de nieve por año hidrológico) [16]. A continuación se aplicaron técnicas de análisis de series temporales para caracterizar

las tendencias de cada uno de los indicadores anteriores en los 7.994 píxeles que cubren Sierra Nevada. El análisis de tendencias permite cuantificar su intensidad (adimensional), su magnitud (expresada en días de adelanto o retraso), el signo (adelanto o retraso) y su grado de significación estadística durante el periodo analizado (14 años). Por último se exploró el patrón espacial de estas tendencias en función de la elevación.

► Resultados

Los resultados obtenidos muestran que la cubierta de nieve ha sufrido cambios significativos en los últimos 14 años. A escala de Sierra Nevada en su conjunto se observa que casi un 80% (Tabla 1) de todos los píxeles muestran una tendencia negativa en la duración de la cubierta de nieve (ver Figura 1 para aclaración sobre el sentido de las tendencias). Sin embargo, esta tendencia es significativa en solo el 5,89% de los píxeles. La fecha de inicio de la innivación

muestra un patrón similar: un 68,03% de los píxeles tiene una tendencia positiva (retraso en la fecha de inicio). Por último, el 80,72% de los píxeles tienen una tendencia negativa (adelanto) en la última fecha con presencia de nieve.

Los valores de tendencias descritos anteriormente se distribuyen en el territorio siguiendo un patrón espacial bien definido. Se observa claramente que tanto la intensidad de la

tendencia (*tau*) y la magnitud (días de cambio) se hacen más acusadas conforme se sube en altura. Esta situación es especialmente notable en el caso de la duración de la nieve (Figura 2). Esto quiere decir que los cambios en la estructura de la cubierta de nieve son más intensos en las cotas más altas.

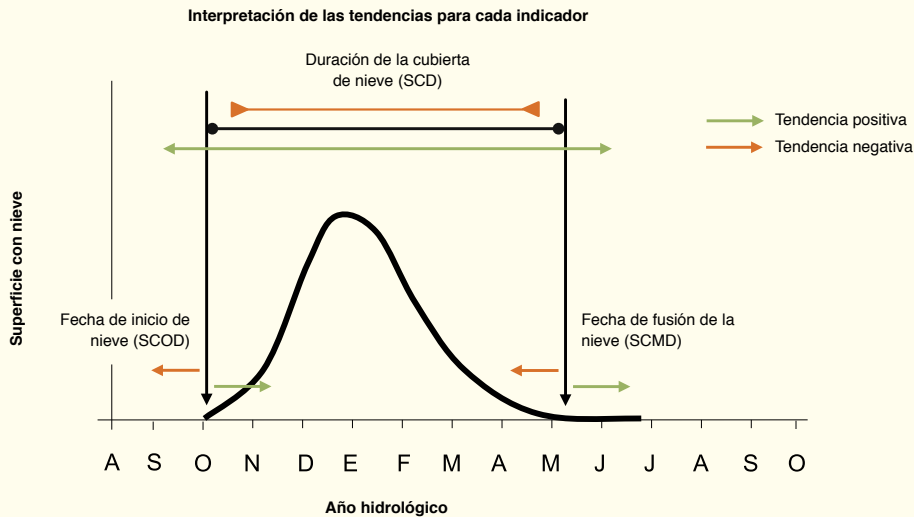
El mencionado patrón espacial se observa claramente en la Figura 3, que muestra un mapa con las tendencias en la duración de la cubierta de nieve.

Por último, se ha analizado el patrón de cambio temporal (a escala de mes) en las tendencias de

duración de la nieve en Sierra Nevada. Aunque los resultados obtenidos no son estadísticamente significativos son relevantes y consecuentes con los descritos anteriormente. Así, las tendencias hacia una reducción en la duración de la nieve son más importantes en los meses de inicio (octubre) y fin (mayo) del periodo de

innivación. Estos resultados indican que cada vez nieve más tarde y que la nieve se funde antes en primavera. Esto podría explicar la reducción en la duración total de la nieve descrita anteriormente.

Figura 1



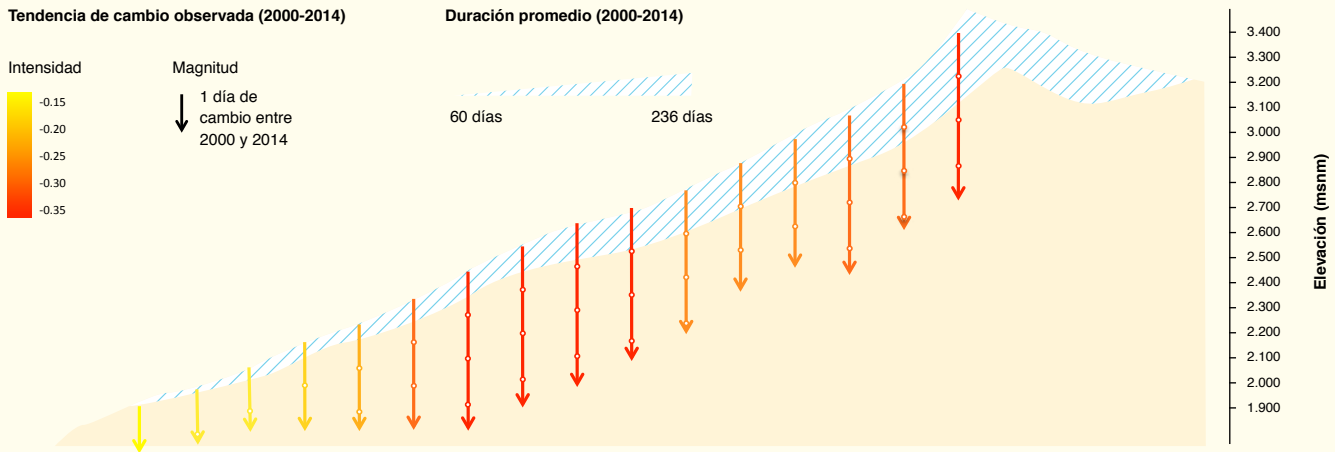
Esquema que representa los cambios en la superficie ocupada por nieve a lo largo de un año hidrológico estándar. Se muestran los indicadores utilizados para describir la estructura de la cubierta de nieve. También se indica el sentido de las tendencias. Una tendencia positiva en la duración implica un aumento en dicha variable. Una tendencia positiva en la fecha de inicio de la nieve implica un retraso en dicha variable. Tendencias positivas en la fecha de fusión de nieve implican un retraso en dicha variable.

Tabla 1

		Píxeles		Píxeles significativos	
Variable	Tendencia	n	%	n	%
Duración de la nieve (SCD)	Positiva	1.455	18,2	6	0,41
	Negativa	6.319	79,05	372	5,89
Fecha de inicio de la innivación (SCOD)	Positiva	5.438	68,03	332	6,11
	Negativa	2.380	29,77	59	2,48
Última fecha con presencia de nieve (SCMD)	Positiva	1.326	16,59	5	0,38
	Negativa	6.453	80,72	717	11,11

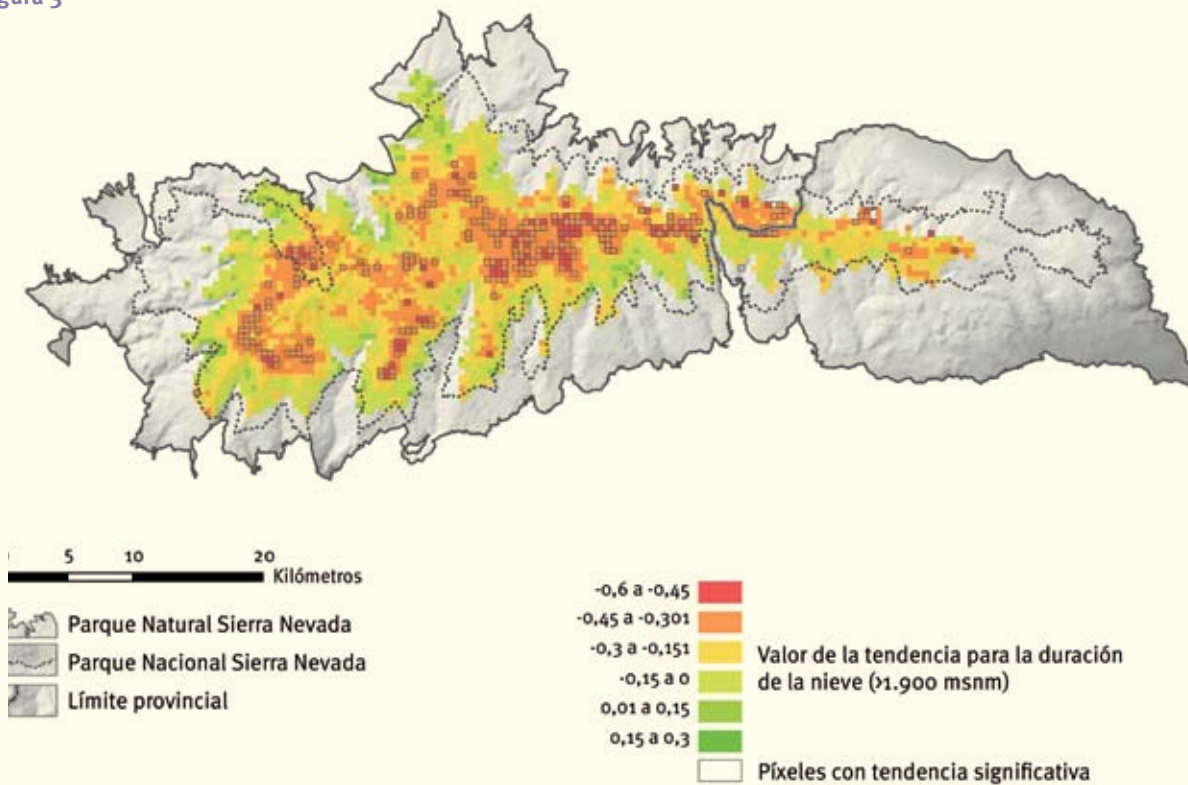
Resultados del análisis de las tendencias (test de Mann-Kendall) anuales en los últimos 14 años para la duración de la cubierta de nieve, fecha de inicio de la innivación y última fecha con presencia de nieve. Para cada variable se muestran el número de píxeles (n) con tendencias negativas ($\tau < 0$) y positivas ($\tau > 0$) así como el número de píxeles significativos (p -valor < 0.05).

Figura 2



Representación gráfica de los cambios en la intensidad (*tau*) y magnitud (pendiente) de la tendencia observada para la duración de la nieve en distintos rangos altitudinales (desde 1900 hasta 3500). El color de las flechas muestra la intensidad de la tendencia en la duración de la nieve (*tau*). La longitud de las flechas ubicadas en cada altitud muestra la magnitud (expresada en días) de cada tendencia. Ej. En el rango de mayor altitud se observa una magnitud de -3 días. Esto quiere decir que la duración de la cubierta de nieve ha sido 3 días menor en los últimos 14 años.

Figura 3



Mapa de magnitud de la tendencia en la duración de la nieve en Sierra Nevada (Altitud > 1.900 msnm). Los píxeles significativos se representan con el contorno marcado.

➤ Discusión y conclusiones

Aunque la serie temporal considerada no es demasiado larga (14 años), las tendencias observadas permiten obtener una información preliminar de los cambios que pueden estar ocurriendo en la cubierta de nieve de Sierra Nevada. En cualquier caso, la tendencia de reducción en la duración de la cubierta de nieve en Sierra Nevada es consistente con la observada en los Alpes [17]. Sin embargo, en otras montañas (Asia central) no se observan tendencias aparentes en el mismo periodo que el estudiado aquí [18]. Esto puede indicar que las causas que explican las tendencias observadas están relacionadas con factores climáticos locales o regionales, como la NAO (*North Atlantic Oscillation*) [19].

La tendencia observada en la duración de la nieve cambia a lo largo del gradiente altitudinal: las zonas más altas tienen tendencias más intensas y de mayor magnitud hacia la reducción de la duración de la nieve. Esto coincide parcialmente con lo observado para las precipitaciones en Sierra Nevada (ver capítulo 1) y con otros estudios similares realizados en los Alpes [17]. El mencionado gradiente de aumento de la intensidad de la tendencia con la altura, se observa también en la temperatura máxima anual (ver capítulo 1). El acoplamiento entre las tendencias de duración de la nieve, la cantidad de precipitación caída y la temperatura máxima anual, constata la relación causal entre el clima y la cubierta de nieve.

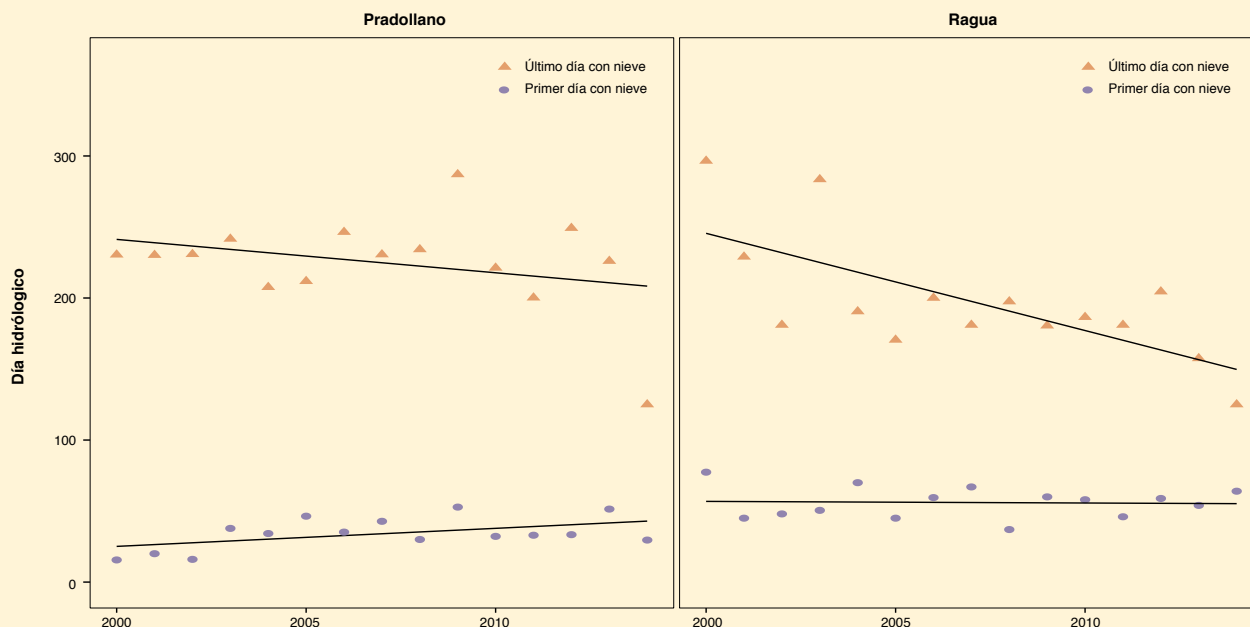
Esta relación es especialmente importante en ambientes mediterráneos, donde buena parte de la precipitación cae en primavera y en invierno, por lo que las probabilidades de que caiga en forma de nieve son mayores.

En definitiva, la serie temporal del sensor MODIS permite conocer con detalle el comportamiento estructural y funcional de la cubierta de nieve a distintas escalas espaciales y temporales. Esto es de gran interés dado el papel de la nieve como elemento suministrador de servicios ecosistémicos de provisión.

Tendencias en la cubierta de nieve y servicios ecosistémicos

La cubierta de nieve constituye un elemento físico muy importante que condiciona la estructura del paisaje y también el funcionamiento de buena parte de los ecosistemas de la montaña. Además constituye un elemento clave para ciertas actividades económicas. Los deportes relacionados con la nieve son un buen ejemplo de este tipo de servicio. Esto pone de manifiesto la importancia de evaluar los posibles im-

pactos del cambio climático sobre el desarrollo de esta actividad. Las dos graficas que se muestran a continuación describen las tendencias observadas en la duración de la cubierta de nieve tanto en la estación de esquí de Pradollano como en la del Puerto de la Ragüa. Se muestra la evolución temporal del primer día con nieve (círculos) y el último día con nieve (triángulos) en cada año hidrológico de la serie 2000-2014.



Gráficas que muestran las tendencias en la fecha de inicio y fin de la presencia de nieve en las estaciones de esquí de Pradollano (derecha) y del Puerto de la Ragüa (izquierda) respectivamente.

Bibliografía

➤ Más referencias en http://refbase.iecolab.es/ref_dossier_resultados.html

2.1. Seguimiento de las características físicas de la capa de nieve

- [1] Bonet, F.J.; Millares, A. & Herrero, J. (2013). *Snowpack as a key element in mountain ecosystem services*. Pp: 329-348. En: Álcara-Segura, D.; Marcelo, C. & Veronica, J. (Eds.) *Earth Observation of Ecosystem Services*. Earth Observation of Global Changes. CRC Press.
- [2] Herrero J.; Millares, A.; Aguilar, C.; Díaz, A.; Polo, M.J. & Losada, M.A. (2011). *WiMMed. Base teórica*. Universidad de Córdoba. Universidad de Granada. Disponible en <http://www.uco.es/dfh>
- [3] Pérez-Palazón, M.J.; Pimentel, R.; Herrero, J. & Polo, M.J. (2014). Analysis of snow spatial and temporary variability through the study of terrestrial photography in the Trevezes River valley. En: Proc. SPIE 9239, *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVI*, 923918.
- [4] Herrero, J. & Polo, M.J. (2012). Parameterization of atmospheric longwave emissivity in a mountainous site for all sky conditions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16 (9): 3139–3147.
- [5] Fierz, C.; Armstrong, R.L.; Durand, Y.; Etchevers, P.; Greene, E.; McClung, D.M.; Nishimura, K.; Satyawali, P.K. & Sokratov, S.A. (2009). The international classification for seasonal snow on the ground. *IHP-VII Technical Documents in Hydrology*. vol. 83. IACS Contribution N°1, UNESCO-IHP, Paris, 80.

2.2. Degradación de hielos relictos glaciares y permafrost en Sierra Nevada

- [6] Gómez Ortiz, A.; Salvador Franch, F.; Sanjosé, J.J.; Palacios, D.; Oliva, M.; Salvà, M.; Tanarro, L.M.; Atkinson, A.; Schulte, L.; Plana, J.A.; Milheiro, B. & Serrano, D. (2012). *Degradación de hielo fósil y permafrost y Cambio Climático en Sierra Nevada*. Pp: 25-43. En: Ramírez, L. y Asensio B. (eds.) *Proyectos de investigación en Parques Nacionales: 2008-2011*. Organismo Autónomo Parques Nacionales. Madrid.
- [7] Gómez-Ortiz, A.; Palacios, D.; Palade, B.; Vazques Selem, L. & Salvador Franch, F. (2012). The deglaciation of the Sierra Nevada (Southern Spain). *Geomorphology*, 159-160: 93-105.
- [8] Gómez-Ortiz, A.; Oliva, M.; Salvador-Franch, F.; Salvà-Catarineu, M.; Palacios, D.; de Sanjosé-Blasco, J.J.; Tanarro-García, L.M.; Galindo-Zaldivar, J. & Sanz de Galdeano, J. (2014). Degradation of buried ice and permafrost in the Veleta cirque (Sierra Nevada, Spain) from 2006 to 2013 as a response recent climate trends. *Solid Earth*, 5: 579-993.

2.3. Régimen térmico del suelo en el dominio del permafrost.

- [9] Ramos, M.; Gómez-Ortiz, A.; Palacios, D.; Tanarro, L.M.; Salvador-Franch, F.; Crespo, F. & Bretón, L. (2002). *Método térmico para el estudio de la distribución de permafrost en Sierra Nevada*. Pp: 91 – 123. En: Serrano, E. & García de Celis, A. (eds.). *Periglaciario en montaña y altas latitudes*. Universidad de Valladolid.

- [10] Salvador-Franch, F.; Gómez Ortiz, A. & Palacios, D. (2010). *Comportamiento térmico del suelo en un enclave de alta montaña mediterránea con permafrost residual (Sierra Nevada, Granada, España)*. Pp: 91-123. En: Blanco, J.J.; De Pablo, M.A. & Ramos, M. (eds.). *Ambientes periglaciares, permafrost y variabilidad climática*. Servicio Publicaciones Universidad de Alcalá de Henares.
- [11] Salvador-Franch, F.; Gómez-Ortiz, A.; Salvà-Catarineu, M. & Palacios, D. (2011). Caracterización térmica de la capa activa de un glaciar rocoso en medio periglaciario de alta montaña mediterránea. El ejemplo del Corral del Veleta (Sierra Nevada, España). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 37 (2): 25-48.
- [12] Oliva, M.; Gómez-Ortiz, A.; Salvador-Franch, F.; Salvà-Catarineu, M.; Pereira, P. & Gerdal, M. (2014). Long term soil temperature dynamics in the Sierra Nevada, Spain. *Geoderma*, 235-236: 170-181.
- [13] Salvador-Franch, F.; Salvà-Catarineu, M.; Oliva, M. & Gómez-Ortiz, A. (2012). *Régimen térmico del suelo y dinámica periglaciaria en la planicie somital del Collado de los Machos (Sierra Nevada)*. Pp: 637-640. En: González Díez, A. (coord.). *Avances de la Geomorfología en España 2010-2012*. Ediciones Universidad de Cantabria.
- [14] Gómez-Ortiz, A.; Salvador-Franch, F.; Oliva, M.; Salvà-Catarineu, M.; Palacios, D. & Tanarro, L.M. (2014). *Comportamiento térmico del sustrato rocoso en el sector de cumbres de Sierra Nevada (2002-2013)*. Pp: 739-748. En: Fernández Montes, S. & Rodrigo, F.S. (Eds.). *Cambio climático y cambio global*. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (AEC), serie A (9).

2.4. Análisis de tendencias (2000-2014) en la cubierta de nieve mediante satélite (sensor MODIS)

- [15] Wang, X. & Xie, H. (2009). New methods for studying the spatiotemporal variation of snow cover based on combination products of MODIS Terra and Aqua. *Journal of Hydrology*, 371: 192–200.
- [16] Pérez-Pérez, R. & Bonet, F.J. (2012). *Seguimiento de la extensión de la cubierta de nieve*. En: Aspizua, R.; Barea-Azcón, J.M.; Bonet, F.J.; Pérez-Luque, A.J. & Zamora, R. (Eds.) *Observatorio de Cambio Global Sierra Nevada: metodologías de seguimiento*. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía. p: 34.
- [17] Latenser, M. & Schneebeli, M. (2003). Long-term snow climate trends of the Swiss Alps (1931-99). *International Journal of Climatology*, 23 (7): 733–750.
- [18] Dietz, A.J.; Kuenzer, C. & Conrad, C. (2013). Snow-cover variability in central Asia between 2000 and 2011 derived from improved MODIS daily snow-cover products. *International Journal of Remote Sensing*, 34 (11): 3879–3902.
- [19] Rodrigo, F.S. & Trigo, R.M. (2007). Trends in daily rainfall in the Iberian Peninsula from 1951 to 2002. *International Journal of Climatology*, 27 (4): 513–529.

Cambios de uso del suelo y de la cubierta vegetal en Sierra Nevada

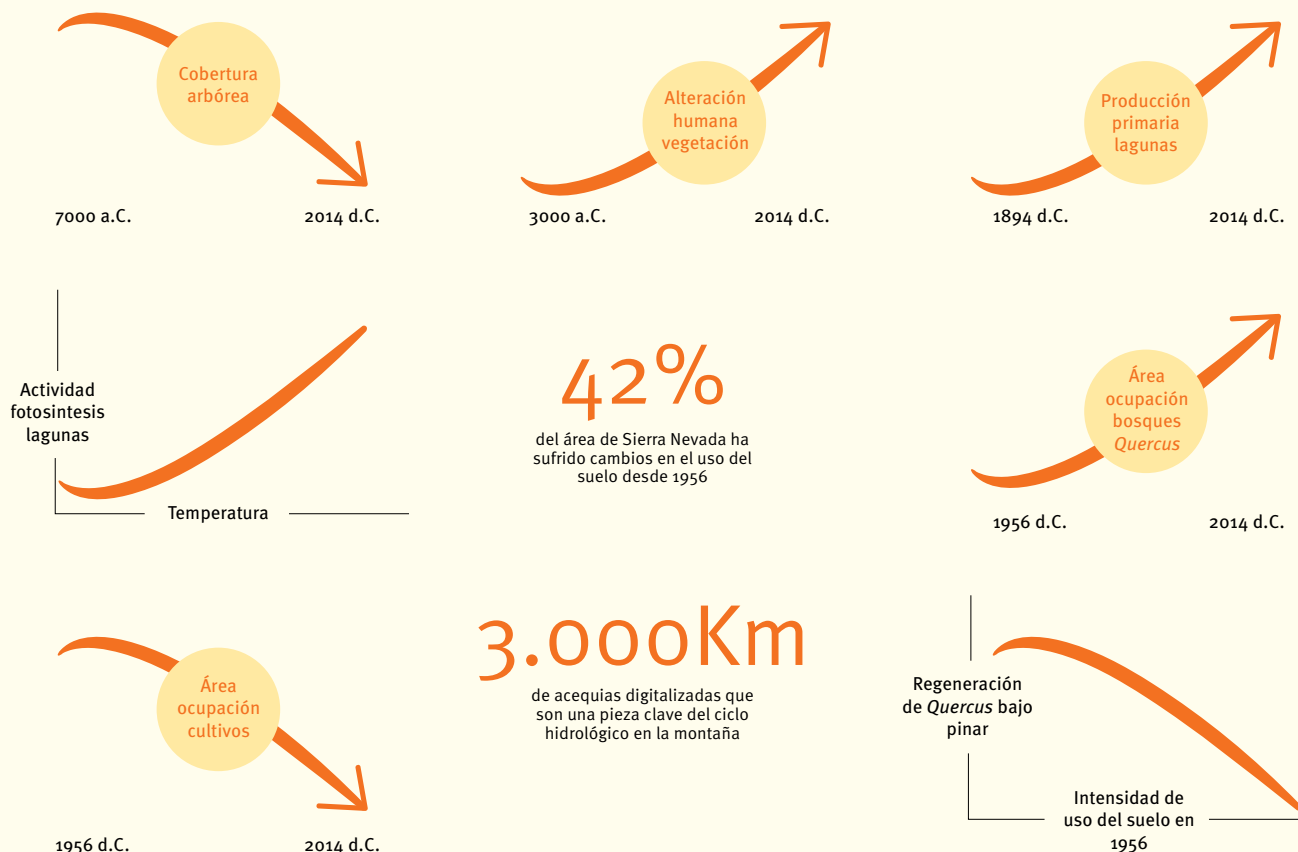
Los cambios de uso del suelo son uno de los principales motores del cambio global. Sus impactos inmediatos sobre el funcionamiento de los ecosistemas son evidentes: pérdida de biomasa tras una deforestación, cambios en la química del suelo cultivado, etc. Pero también se han descrito efectos retardados de los cambios de uso del suelo en la dinámica de los ecosistemas: alteración de la composición específica de los bosques como consecuencia de su manejo histórico, tasa de regeneración diferencial de árboles en función de los usos existentes en el pasado, etc. Esta componente diferida en el tiempo de los impactos de los cambios del suelo hace que los usos y aprovechamientos pasados deban de ser tenidos en cuenta tanto para

comprender la dinámica presente como para tratar de predecirla en el futuro. Para identificar y cuantificar el papel de los cambios de uso en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas es fundamental realizar un seguimiento de dichos cambios. Así, la reconstrucción del pasado constituye un aspecto clave que nos ayuda a distinguir entre las causas naturales y antrópicas del cambio global.

La actividad humana en Sierra Nevada ha provocado cambios seculares en la estructura del paisaje. A modo de ejemplo, en los últimos 50 años se ha producido un cambio de uso del suelo en más de la mitad de las 170.000 ha que ocupa el espacio protegido. Esto hace que la

caracterización retrospectiva de los cambios de uso del suelo sea un aspecto muy importante dentro del programa de seguimiento de los impactos del cambio global de Sierra Nevada.

El presente capítulo muestra los resultados obtenidos en este ámbito temático. En primer lugar, se ha avanzado notablemente en completar la serie temporal de cambios de uso del suelo en Sierra Nevada desde hace miles de años hasta la actualidad. En este sentido, destacan los trabajos de reconstrucción de la vegetación mediante palinología que permiten conocer la abundancia relativa de especies vegetales desde el último periodo glacial.



Resumen gráfico de los principales resultados descritos en el presente capítulo. Se muestran tendencias temporales de variables biofísicas (gráficas con flechas), relaciones entre variables (gráficas con ejes) y cifras significativas (números o porcentajes).

Se observa un proceso de aridificación progresiva desde hace 7.000 años. También se constata un aumento paulatino de las señales de la actividad humana desde hace 3.000 años. Este proceso de aumento de temperatura y de aridez también se pone de manifiesto en los indicadores paleolimnológicos de las lagunas nevadenses. El análisis del contenido de clorofila-a de dichas lagunas muestra una tendencia ascendente bastante bien correlacionada con los datos de temperatura observados en los últimos 150 años. Además, gracias a la recopilación de información histórica (cuadros, mapas forestales, catastro, etc.) ha sido posible

reconstruir con cierto detalle la vegetación de zonas concretas de Sierra Nevada en los últimos 100 años. Estos resultados muestran un claro proceso de reforestación de la montaña debido tanto al abandono de los usos agrosilvopastorales como a la plantación activa (pinos de repoblación). Esta reforestación ha provocado una reducción de los usos agrícolas en Sierra Nevada, que han quedado relegados a las partes bajas cerca de los núcleos urbanos. Buena parte de la estructura de usos del suelo de Sierra Nevada en los últimos siglos está vertebrada por una densa red de acequias cuya caracterización detallada se describe también en este capítulo.

El segundo conjunto de resultados muestra un caso de estudio que cuantifica el impacto que aún tienen los usos del suelo de 1956 en una función ecológica clave para los ecosistemas mediterráneos: la regeneración de quercíneas. Se ha observado cómo los pinares de repoblación plantados sobre encinares muestran aún hoy más regeneración de encina que aquellos plantados sobre lugares más intensamente utilizados por el hombre (pastos, matorrales, cultivos). Todos los resultados mostrados en este capítulo tienen una aplicación directa a las actuaciones de manejo del territorio por parte de los gestores.

3.1. Reconstrucción de la vegetación a partir del análisis palinológico

Jiménez-Moreno, G.
Universidad de Granada

Resumen

El estudio de polen del registro sedimentario de los últimos 11.500 años de las lagunas y borreguiles de Sierra Nevada indica un máximo de temperatura y humedad entre los 10.500 y 7.000 años. Esto se deduce por la abundancia de especies arbóreas (sobre todo *Pinus* y *Quercus* y en menor proporción *Betula*) en Sierra Nevada y la abundancia de algas (*Pediastrum*, *Botryococcus*) en los humedales alpinos. A partir de los últimos 7.000 años, se produce un proceso de aridificación progresiva con la disminución de especies arbóreas y el aumento de hierbas xerófitas (como *Artemisia*, *Amaranthaceae*). El proceso de aridificación progresiva se encuentra interrumpido por oscilaciones climáticas entre las que se identifican varios periodos de sequías importantes (p.e., periodo medieval) y periodos húmedos (p.e., periodo romano). A partir de los últimos 3.000 años se observa un gran impacto del hombre en Sierra Nevada, a través del pastoreo y de la eutrofización de algunos humedales así como el cultivo masivo de *Olea* (a partir de 1900 d.C.) a altitudes más bajas y la reforestación por *Pinus* (a partir de 1950 d.C.).

> Objetivos y metodología

Se ha realizado un estudio de los granos de polen del registro sedimentario de los últimos 11.500 años de las lagunas y borreguiles de Sierra Nevada. En cada muestra de sedimento se identificaron 300 granos de polen generalmente a nivel de familia y género. La clasificación se realizó por comparación con colección de pólenes actuales y utilizando diferentes atlas a través de microscopios de luz transmitida a 400 aumentos. Las abundancias de las diferentes especies se transformaron en porcentajes con respecto al total (sin incluir especies acuáticas; p.ej. *Cyperaceae*). La zonación de los diagramas polínicos se realizó a partir de un análisis de cluster mediante el software CONISS. El porcentaje de algas se calculó con respecto al total de granos de polen.

> Resultados

Tendencias generales para el Holoceno.

11.500 – 10.500 años. Los espectros de polen de la Laguna de Río Seco están caracterizados por la abundancia de *Artemisia*, *Ephedra* y *Amaranthaceae* y en menores proporciones *Poaceae*, *Juniperus*, *Salix*, *Herniaria*, y tipo *Silene* (Figura 1). También se alcanzan los máximos porcentajes de *Botryococcus* de todo el registro.

10.500 – 7.000 años. Tanto en la Laguna de Río Seco como en los Borreguiles de la Virgen (Figuras 1 y 2) se alcanzan los máximos porcentajes de especies arbóreas, sobre todo en *Pinus* y *Quercus* (de hoja caduca), pero también en *Betula*, *Alnus* y *Salix* [1,2]. Por otro lado, *Artemisia*, *Juniperus* y *Amaranthaceae* registran porcentajes mínimos. Las especies acuáticas, como *Botryococcus*, *Pediastrum* y *Cyperaceae*, alcanzan máximos durante este periodo.

7.000 – 5.000 años. *Pinus* se mantiene abundante, pero otras especies forestales como *Quercus* de tipo caduco y *Betula* disminuyen. Las especies acuáticas también disminuyen considerablemente.

5.000 – 3.000 años. *Pinus* disminuye progresivamente (Figura 3) y por el contrario *Artemisia* y *Amaranthaceae*, aumentan.

3.000 – actualidad. *Pinus* sigue disminuyendo hasta el año 1950 en el que tanto en la Laguna de Río Seco, como en los Borreguiles de la Virgen se registran aumentos considerables. *Artemisia* y *Amaranthaceae* siguen aumentando. *Sporormiella*, un hongo asociado a las heces de herbívoros, aumenta considerablemente tanto en el registro de Río Seco (últimos 3.000 años) como en Borreguiles de la Virgen (últimos 200 años). La abundancia de tecamebas (Protozoa, Rhizopoda) en los Borreguiles de la Virgen en los últimos 200 años indica eutrofización [2].

Cambios en la vegetación a escala de milenios

Además de la tendencia general a la disminución en especies arbóreas a partir de los 7.000 años, se observan importantes variaciones cíclicas en las abundancias polínicas, sobre todo en *Pinus* y *Quercus*. En las secuencias de Río Seco y Borreguiles de la Virgen se observan mínimos en *Pinus* alrededor de 6.500, 5.200 y 4.000 años. Y en la secuencia de la Laguna de la Mula se observan mínimos en *Quercus* (de hoja caduca y perenne) entre 3.800-3.100 y 1.800-600 años (Figura 4).

➤ Discusión y conclusiones

Deglaciación en Sierra Nevada (11.500 – 10.500 años)

El registro sedimentario más antiguo de Laguna de Río Seco indica una vegetación de tipo esteparia (*Artemisia*, *Amaranthaceae*, *Ephedra*), lo que se asocia con condiciones muy áridas y frías. Similares datos de polen se han registrado en la turbera de Padul [4] y en la Cueva de la Carihuela [5], así como en registros marinos del Mar de Alborán.

Holoceno temprano cálido y húmedo (10.500 – 7.000 años)

La abundancia de especies forestales (*Pinus*, *Quercus*, *Betula*) y taxones acuáticos (*Botryococcus*, *Pediastrum*) durante el Holoceno temprano en Sierra Nevada indica las condiciones más cálidas y húmedas de las registradas durante los últimos 12.000 años. Un Holoceno temprano muy cálido podría ser explicado por el máximo de insolación en verano que se alcanza en este

momento y que produciría un calentamiento climático. El máximo de humedad se podría explicar por un aumento en esta época del contraste de temperatura tierra/mar en la región Mediterránea durante el otoño, lo que favorecería el aumento de precipitaciones durante el otoño/invierno.

Enfriamiento y aridificación durante el Holoceno medio y tardío (7.000 – actualidad)

En los registros polínicos de Sierra Nevada se observa un proceso progresivo de deforestación y disminución de las especies acuáticas en el registro sedimentario de los humedales. Esta tendencia, que empieza a partir de 7.000 años y se intensifica a partir de los 5.000 años, podría ser explicada por un progresivo enfriamiento climático y, sobre todo, por un aumento en la aridez. Este proceso de aridificación ha sido observado en otros registros polínicos de esta región (p.ej. Sierra de Cazorla o Mar de Alborán) y a partir de muchos otros indicadores paleoclimáticos para

toda la región Mediterránea (espeleotemas, niveles de lagos, aportes fluviales y eólicos). Este cambio climático, disminución de la temperatura y aumento en la aridez, se explica por la disminución de la insolación en verano.

Variaciones climáticas a escala de milenios

La tendencia hacia un incremento en la aridez está caracterizada en los registros de polen de Sierra Nevada por cambios cíclicos de escala más corta. Se pueden reconocer grandes sequías alrededor de 6.500, 5.200 y 4.000-3.500 y 1.500 años. Algunas de estas sequías son regional- y mundialmente reconocidas (ver resumen en [1]). Un ejemplo, muy bien documentado, es la sequía que caracteriza la época medieval, muy evidente en el registro de la Laguna de la Mula [3]. Entre periodos áridos hay otros relativamente más húmedos, como el observado en la Laguna de la Mula coincidiendo con el máximo de humedad de la época romana [4]. Estas variaciones climáticas probablemente tengan que

Figura 1

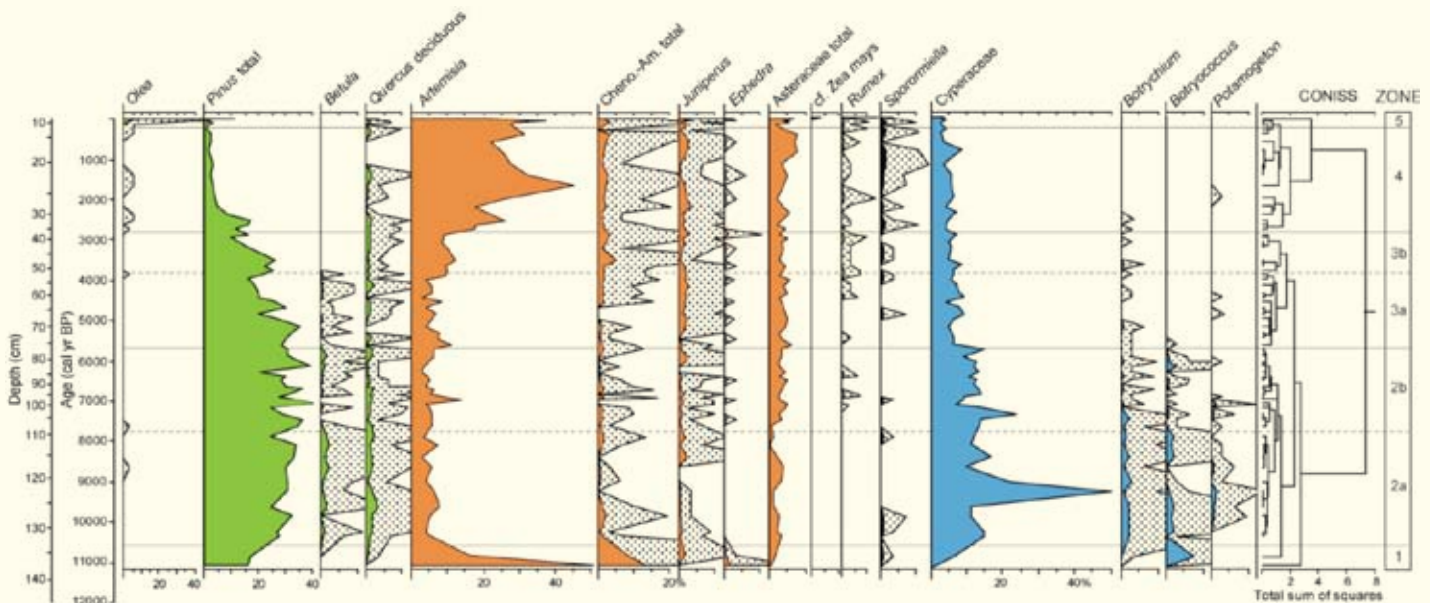


Diagrama de polen sintético de la Laguna de Río Seco. En verde las especies arbóreas, rojo las herbáceas y en azul las acuáticas. A la derecha se muestran las zonas polínicas identificadas a través del tiempo. Modificado de [1].

ver con cambios cíclicos en la frecuencia del fenómeno de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO en inglés) y periodos áridos se deberían a fases más largas de NAO + y los periodos más húmedos a fases más largas de NAO -. Estos últimos producirían un aumento de la precipitación en la región Mediterránea.

Impacto del hombre en la vegetación, pastoreo y cultivo

Múltiples evidencias muestran que a partir de los 3.000 años y hasta la actualidad se intensifica la actividad del hombre en Sierra Nevada. A partir de este momento se produce un

aumento de la frecuencia de incendios en esta región [3], así como evidencias de pastoreo y de minería y más recientemente el cultivo de olivo a gran escala a altitudes más bajas así como la reforestación.

Figura 2

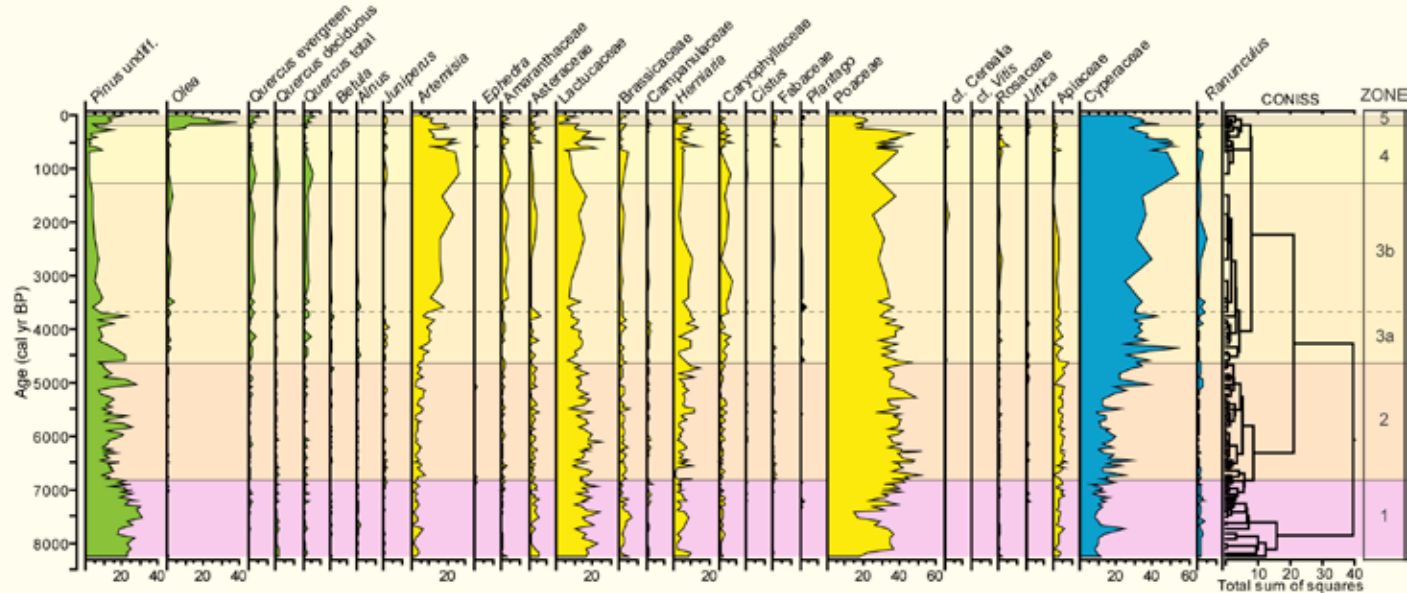
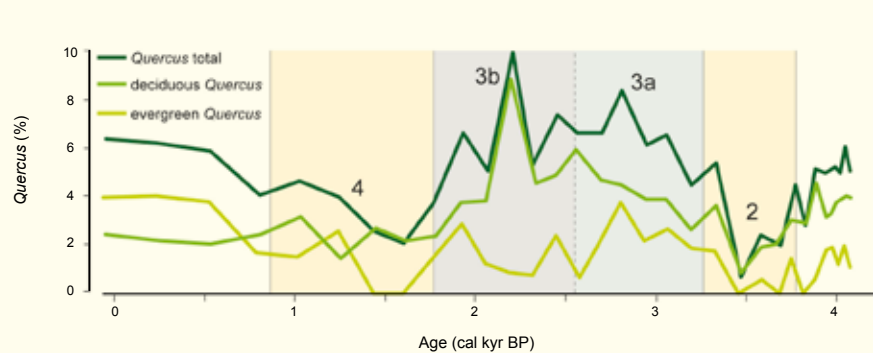


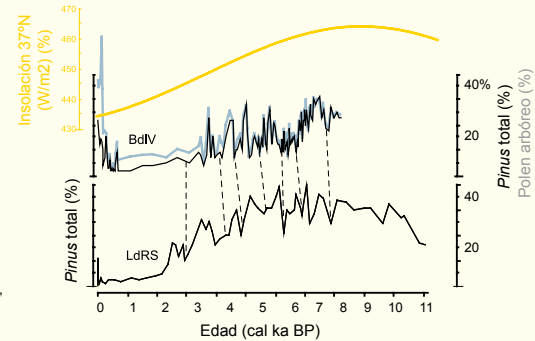
Diagrama de polen sintético de los Borreguiles de la Virgen. En verde las especies forestales, en amarillo las herbáceas y en azul las acuáticas. A la derecha se muestran las zonas polínicas identificadas a través del tiempo. Modificado de [2].

Figura 3



Evolución del porcentaje de *Quercus* (de hoja caduca y perenne) en los últimos 4.000 años registrado en la Laguna de la Mula [3]. Los máximos porcentajes de *Quercus* de hoja caduca se registran durante el período húmedo romano (en azul). En amarillo se muestran dos periodos relativamente áridos.

Figura 4



Comparación entre el porcentaje de *Pinus* de la Laguna de Río Seco y de los Borreguiles de la Virgen [1-2] con la curva de insolación de verano a 37°N. La tendencia a partir de los 7.000 años es a una deforestación (aridificación).

3.2. Análisis de indicadores paleolimnológicos en las lagunas de Sierra Nevada

Pérez Martínez, C.
Universidad de Granada

Laguna de Río Seco (3.030 msnm).



Resumen

Se han analizados los restos silíceos de diatomeas y el contenido de clorofila-a fósil en los últimos 150 años de seis lagunas de Sierra Nevada. Los valores de clorofila-a de todas las lagunas reflejan un aumento de la misma a lo largo del siglo XX. La magnitud de las variaciones experimentadas por la comunidad de diatomeas a lo largo de los últimos 150 años es sensiblemente diferente entre lagunas, siendo Río Seco y Borreguil las que presentan las variaciones más destacables.

Los cambios observados en las lagunas parecen estar relacionados con los efectos directos e indirectos del incremento de temperatura observado en este periodo. Además de esta respuesta regional, se observan respuestas locales determinadas por la particularidades de cada laguna.

➤ **Objetivos y metodología**

El objetivo de este trabajo es estudiar una serie de indicadores paleolimnológicos en varias lagunas de Sierra Nevada que son especialmente útiles para cuantificar la producción de biomasa en estos ecosistemas. Se analiza la evolución temporal del contenido de clorofila y su relación con la temperatura.

Las características morfométricas y limnológicas de las seis lagunas analizadas se muestran en la Figura 1.

Restos silíceos de diatomeas. Las muestras de sedimento se sometieron a digestión con ácido y los restos silíceos se montaron en portaobjetos con Naphrax para su recuento [6]. Se

identificaron y enumeraron un mínimo de 300 frústulos de diatomeas en cada intervalo usando un microscopio óptico a 1.000 aumentos y contraste de interferencia (DIC).

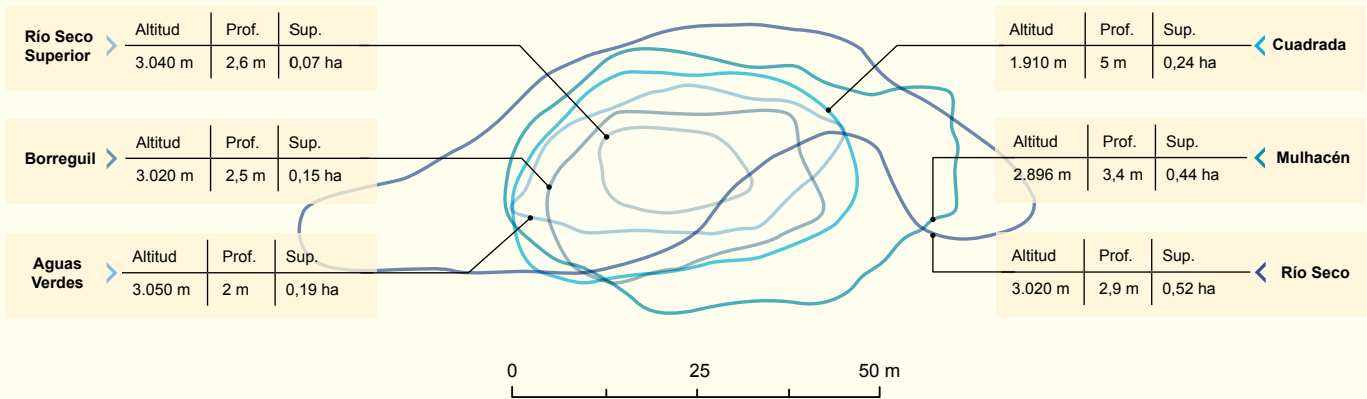
Análisis de la clorofila-a. La concentración de clorofila-a fósil (clorofila-a + derivados) que se conserva en los sedimentos se infirió mediante la técnica VNIR (*Visible-Near Infrared Reflectance Spectroscopy*) [7].

Obtención y tratamiento de los datos climáticos. Se ha escogido la serie de temperatura de la estación 3.195 de Madrid (Parque del Retiro) pues, a pesar de estar relativamente alejada geográficamente, es una de las series más

largas (desde 1869) y presenta una elevada correlación con otras series de datos más cortas de la zona de estudio como las de Armilla, Padul y también con las series climáticas recopiladas por el Observatorio del Cambio Global de Sierra Nevada. La serie de precipitación que presentó una mejor correlación con esta última fue la de la estación de la Base de San Fernando de Cádiz (desde 1841).

Análisis de datos. Se realizó un análisis de componentes principales con los datos de abundancia relativa de distintas especies de diatomeas. Estos datos se correlacionaron con los valores de clorofila en cada una de las lagunas.

Figura 1



Representación esquemática del contorno y principales características de las lagunas estudiadas. Prof.: Profundidad. Sup.: Superficie.

➤ **Resultados**

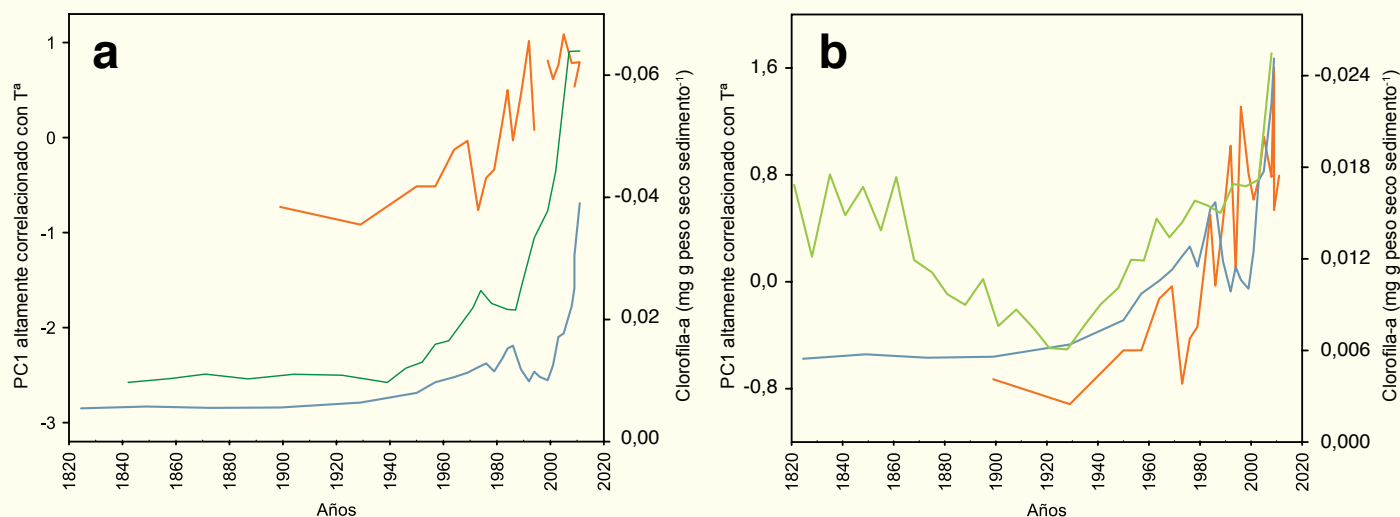
La magnitud de las variaciones experimentadas por la comunidad de diatomeas a lo largo de los últimos 150 años es sensiblemente diferente entre lagunas de modo que Río Seco y Borreguil presentan las variaciones más destacables, seguidas de Aguas Verdes y Mulhacén y finalmente Cuadrada y Río Seco Superior. Respecto a los cambios observados en la composición de especies, destaca el incremento de especies alcalófilas y la disminución de especies acidófilas así como de epífitas y tycoplanctónicas.

Los valores de clorofila-a de todas las lagunas reflejan un aumento a lo largo del siglo XX, comenzando éste a principios de siglo en Cuadrada y Río Seco Superior y en la segunda mitad del mismo en el resto de las lagunas (Figura 2).

La variable que resume los cambios experimentados por la comunidad de diatomeas en el tiempo se correlacionan con los valores de clorofila en cada una de las lagunas. Respecto a la relación de estas dos variables con los datos climáticos disponibles, las seis lagunas

muestran una correlación significativa entre los valores de clorofila-a y los valores medios de temperatura anual mientras que con la precipitación sólo se encuentra una relación significativa para Borreguil. Además, los cambios experimentados por la comunidad de diatomeas (factor 1) muestran una correlación significativa con los valores de temperatura media en cada una de las lagunas excepto en Río Seco Superior si bien con la precipitación sólo se encuentra una relación significativa para Río Seco.

Figura 2



Cambios en la composición de la comunidad de diatomeas (color azul), evolución temporal de los valores de la clorofila-a (color verde) y de la temperatura media anual (en anomalías respecto al período 1961-90, color naranja) en las lagunas Cuadrada (a) y de Río Seco (b).

➤ Discusión y conclusiones

El incremento en la clorofila y las variaciones observadas en la comunidad de diatomeas de las seis lagunas indican que estos sistemas han sufrido cambios significativos en sus variables limnológicas en los últimos 150 años. La robusta relación de la clorofila y de los cambios en las diatomeas con la temperatura sugiere un efecto del incremento de temperatura sobre estos ecosistemas acuáticos. La producción primaria del sistema, representada por los valores de clorofila, responde al incremento directo en la temperatura del agua y además a los efectos indirectos derivados de un alargamiento del periodo de crecimiento de las especies lacustres asociado al incremento del periodo libre de hielo [8]. Las diatomeas pueden reflejar la variabilidad climática de diferentes modos: efecto directo de la temperatura, modificación de la estabilidad termal, cambios en la calidad del agua y cambios en el hábitat [9]. Así, la disminución de especies ticoplanctónicas puede explicarse por la mayor estabilidad

termal de la columna de agua junto con la disminución en el flujo de agua de entrada y salida y de la profundidad media de las lagunas [10]. Por otro lado, el incremento de pH derivado del de temperatura puede ser la causa de la disminución de especies acidófilas y del incremento de especies alcalófilas. Finalmente, el alargamiento del periodo libre de hielo junto con las mayores temperaturas y, posiblemente la disminución de las precipitaciones observadas principalmente a partir de los años 80, determinan la disminución del nivel de agua en las lagunas, así como la disminución del grado de humedad de los borreguiles. En estas condiciones, las especies de diatomeas epífitas pueden ver disminuida su probabilidad de supervivencia en estos hábitats. Estos hechos explicarían las diferencias en la magnitud de la respuesta de la comunidad de diatomeas entre lagunas, de modo que aquellas lagunas con una mayor superficie de borreguil y mayor relación superficie borreguil/superficie laguna

(Río Seco y Borreguil) presentan modificaciones más patentes que las que presentan un área de borreguil menor y menos cambios de nivel de agua (Aguas Verdes y Mulhacén) y que las lagunas con ausencia de borreguil circundante (Cuadrada y Río Seco Superior).

En resumen, las seis lagunas analizadas presentan cambios en la comunidad de diatomeas y en los valores de clorofila durante los últimos 150 años que parecen estar relacionados con el incremento de temperatura observado en este periodo. Además de esta respuesta, que podemos considerar regional, se observan respuestas locales determinadas por la particularidades de cada laguna, entre las que destacan la presencia y extensión de los borreguiles circundantes, las características morfométricas de las lagunas y su altitud.

3.3. Evolución de los usos del suelo en Sierra Nevada en los últimos 50 años y cambios en el paisaje

Jiménez-Olivencia, Y.¹ ; Porcel-Rodríguez, L. ¹ ; Caballero-Calvo, A. ¹ y Bonet, F.J.²

¹Universidad de Granada ²Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía, Universidad de Granada

Resumen

Las diversas estrategias de intervención del hombre en la naturaleza que se han sucedido a través del tiempo han contribuido, en cada periodo histórico, a definir un particular modelo de relaciones hombre-medio. Cada uno de estos modelos influye decididamente en la ordenación del espacio y en la configuración de los paisajes del macizo nevadense. El propósito de esta investigación es hacer un seguimiento de las grandes transformaciones que han tenido lugar en la ocupación del suelo y en la estructura de los paisajes a consecuencia de los profundos cambios que pueden reconocerse entre el contexto social y económico de los años 50 y el contexto actual. Estos cambios han sido muy notables en Sierra Nevada, donde se observa un incremento en la superficie forestal provocado por el abandono de los cultivos y posterior recolonización de la vegetación leñosa por la implantación de las repoblaciones forestales y por la densificación de las masas forestales naturales (encinares y robledales).

> Objetivos y metodología

Este estudio persigue tres objetivos concretos:

- Cuantificar la magnitud de las transformaciones que han tenido lugar en los usos del suelo entre 1956 y 2006.
- Identificar las principales dinámicas de cambio relacionándolas con los procesos de transformación del contexto social y económico.
- Establecer la forma en que han afectado estos cambios a la configuración de los distintos tipos de paisaje.

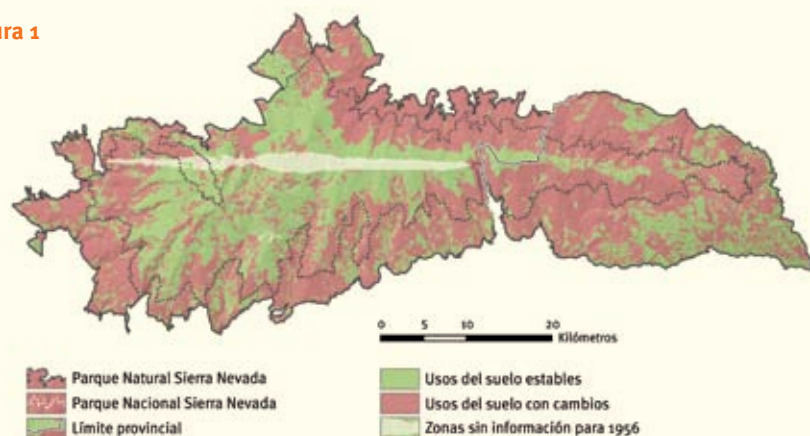
El método utilizado para identificar los cambios en los usos del suelo ha sido la interpretación a escala de detalle de las ortofotografías digitales de los años 1956, 2006 y 2011 [11-13, 15]. A partir de ahí se elaboran sendas cartografías de usos del suelo a escala 1:15.000 para toda Sierra Nevada y a escala 1:5.000 para formaciones vegetales concretas.

Este enfoque diacrónico ha permitido analizar la importancia de la superficie ocupada por cada tipo de cobertura del suelo en cada año, determinando sus variaciones, cuantificando

y localizando dónde se han producido las mayores transformaciones. Todo ello utilizando las herramientas propias que ofrecen los sistemas de información geográfica.

Con objeto de determinar el efecto que estas transformaciones han tenido en el paisaje se han identificado 4 grandes tipos paisajísticos en Sierra Nevada [12], en cada uno de los cuales los cambios en la distribución de los usos del suelo han contribuido a modificar la composición del paisaje en un determinado sentido.

Figura 1



Mapa que muestra los cambios de uso del suelo ocurridos en Sierra Nevada (naranja) desde 1956 hasta 2006.

> Resultados

Los cambios experimentados por los paisajes en el último medio siglo afectan al 42,8% de la superficie del Espacio Protegido (Figura 1)

Los mapas de dinámicas de cambio elaborados para cada tipo de cobertura del suelo nos muestran (Figura 2):

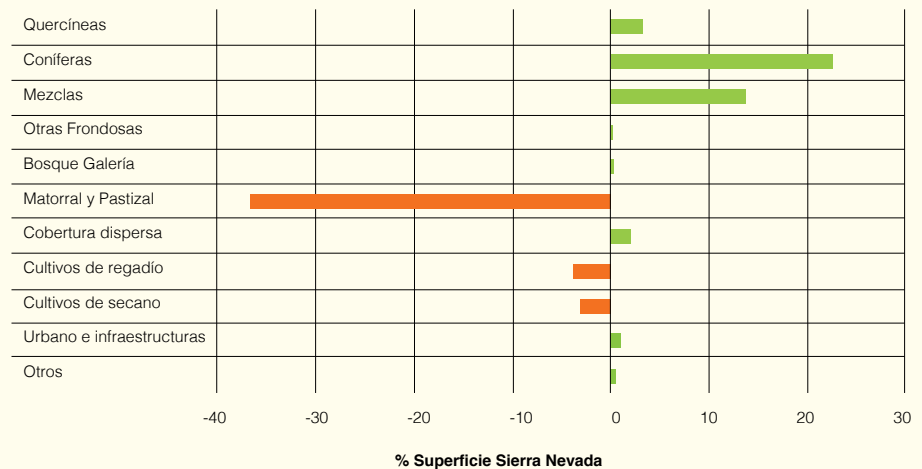
- Un aumento de la superficie de las formaciones arboladas que han pasado de un 15% a un 51,23% de la superficie total del Espacio Protegido.

- Mayor progresión de los pinares sobre los bosques de vegetación autóctona de modo que las quercíneas pasan del 9,92% de la superficie total al 13,29%, en tanto que las coníferas pasan del 2,47% al 24,97%.
- Densificación del arbolado disperso y de los bosques naturales.
- Un desarrollo de las formaciones de ribera en los principales barrancos de la Sierra.
- Una disminución de la superficie ocupada por los campos de cultivo, los cuales ocupaban el 17,08% de la superficie total del Espacio Protegido en 1956, pero sólo el 4,72% en 2006.
- Crecimiento de los espacios urbanos cons-truidos, desde el 0,09% hasta el 0,64%.

Las transformaciones en la distribución de los usos del suelo afectan de manera diferente a los distintos tipos de paisaje de la Sierra:

1. Los paisajes naturales de la alta montaña (zona alpina sin vegetación arbórea):
 - Reforestación con coníferas en espacios potencialmente ocupables por el enebro y el pastizal de alta montaña.
 - Abandono de los cultivos de altura o cultivos de sierra y colonización de los campos por comunidades seriales oromediterráneas.
 - Construcción de la estación invernal y extensión posterior del área urbanizada y de la zona esquiable.
2. Los paisajes forestales de las vertientes umbrías (vertiente norte):
 - Sustitución de matorrales y pastizales de media y alta montaña por grandes extensiones de pinares de repoblación muy densas.
 - Progresión y consolidación del bosque autóctono a partir de formaciones de matorral y pastizal con encinas dispersas. También se observa un ascenso altitudinal en el límite del árbol.
 - Abandono de las prácticas agrícolas de secano y recolonización vegetal espontánea.

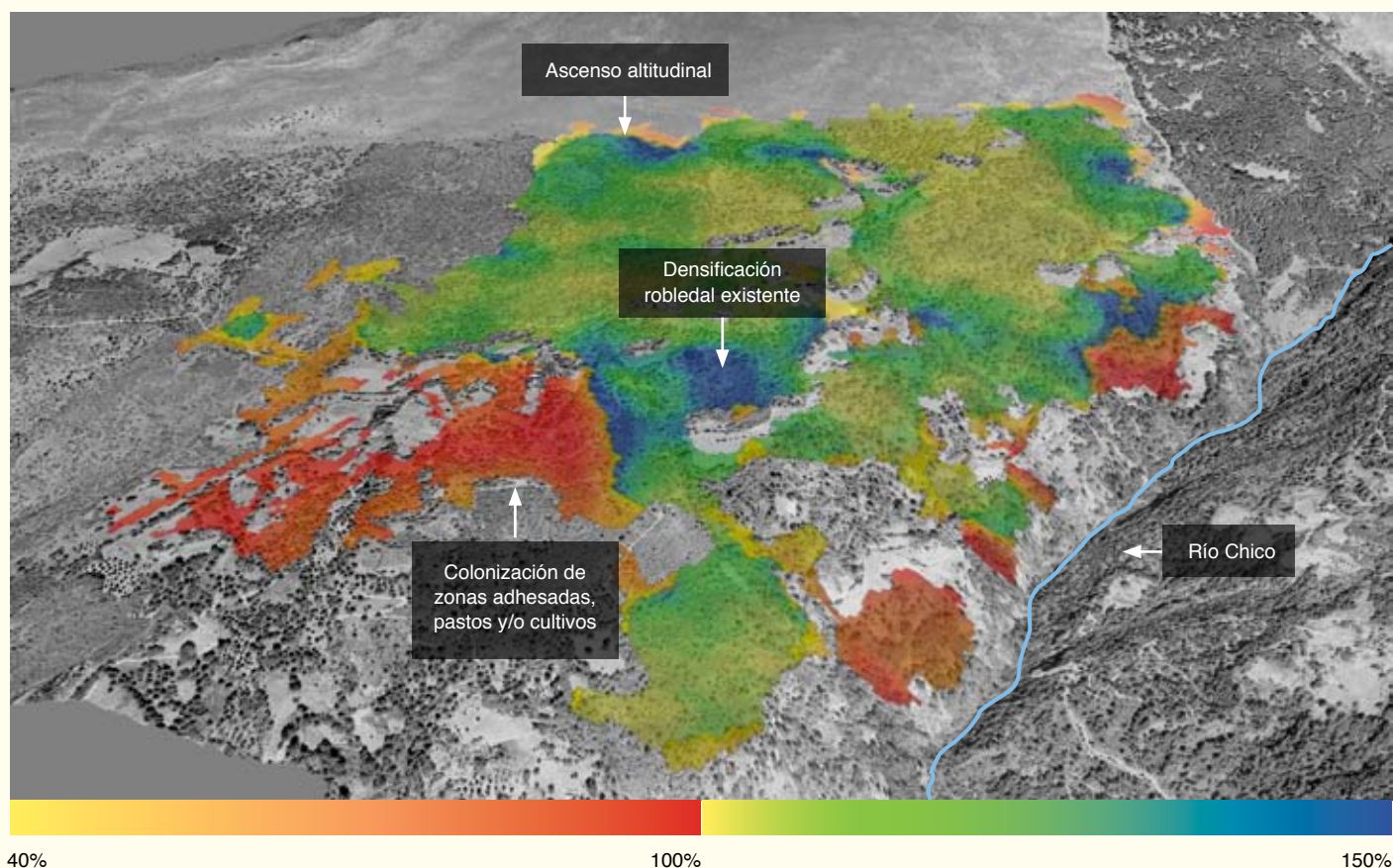
Figura 2



Se muestran los cambios en el porcentaje de ocupación superficial de las formaciones vegetales más importantes de Sierra Nevada. El gran aumento de la superficie de pinares de repoblación y de bosques de *Quercus* parece estar acoplado al descenso en la superficie de matorral y pastizal.

3. Los paisajes calcáreos y agro-forestales de los valles occidentales:
 - Gran extensión de pinares de repoblación que engloban por completo a las masas relictas de *Pinus sylvestris* subsp. *nevadensis*. Sin embargo, estas masas relictas ahora muestran una mayor densidad y superficie arbolada.
 - Consolidación de algunas masas de bosquetes de encinas y robles en las cabeceras de los ríos.
 - Colonización de vegetación natural arbolada en ámbitos agrícolas en abandono.
 - Sustitución de los cultivos mixtos por una arboricultura monoespecífica de olivos o almendros.
 - Ocupación urbana de la zona de contacto con el área metropolitana de Granada (espacios libres del espacio metropolitano).
 4. Los paisajes agro-forestales de la solana de Sierra Nevada (Alpujarra y ladera sur):
 - Reforestación en los espacios cubiertos por matorral y pastizal con grandes extensiones de coníferas.
- Aumento de la superficie ocupada por encinares y robledales de *Quercus pyrenaica*. Además se ha producido una densificación del estrato arbóreo de los robledales y un ascenso altitudinal del límite del árbol en algunas ocasiones (Figura 3)
 - Abandono de gran parte del espacio agrario que se transforma en espacio de colonización de la vegetación natural.
 - Frecuente sustitución de los tradicionales cultivos de herbáceos y mixtos por cultivos arbóreos.
 - Crecimiento de los núcleos de población que afecta a la estructura urbana tradicional y al perfil que éstos muestran desde el exterior.

Figura 3



Cambios de densidad y extensión del robledal de Cañar (ladera sur de Sierra Nevada). Los colores amarillos-azules muestran cambios de densidad en lugares en los que tanto en 1956 como en 2006 había un robledal. Se observa una clara densificación de la masa provocada probablemente por la disminución de las actividades agropecuarias. Los colores rojizos muestran cambios de densidad en lugares en los que apenas había robles en 1956 pero sí en 2006. Se trata de lugares donde el robledal ha extendido su distribución. Destaca el ligero ascenso altitudinal en el límite del árbol y el notable proceso de colonización de cultivos y pastizales abandonados.

> Discusión y conclusiones

Los procesos de reforestación llevados a cabo en el macizo y el abandono del espacio agrícola tradicional constituyen la causa de los cambios más significativos en el periodo estudiado. Junto a ello se observa un incremento de los espacios transformados a causa de la expansión de las actividades de ocio deportivo en la alta montaña occidental y de turismo rural en las poblaciones de la vertiente sur.

Los patrones de cambio observados a escala de Sierra Nevada están fuertemente condicionados por las actividades humanas [14]. Esta actividad secular ha modificado y modificará tanto el funcionamiento de los ecosistemas naturales como su capacidad para producir servicios ecosistémicos, especialmente en un contexto de cambio climático. La interacción de ambos motores de cambio (usos del suelo

+ clima) da lugar a un escenario complejo que deberá ser tenido en cuenta para diseñar mecanismos de adaptación en el futuro inmediato.

3.4. Análisis histórico de los cambios socio-ecológicos en el municipio de Cáñar (Alpujarra de Granada) en los últimos 5 siglos

Moreno-Llorca, R.A.; Pérez-Luque, A.J.; Bonet, F.J. y Zamora, R.

Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía, Universidad de Granada

Resumen

Para entender los factores que han influido en la distribución y dinámica de la vegetación en la actualidad, es necesario mirar atrás en el tiempo y preguntarnos sobre el manejo humano pretérito en el territorio. En este sentido, la recopilación de información histórica tanto de los usos del suelo como de la distribución de la vegetación constituye un aspecto clave para comprender las implicaciones del cambio global en ámbitos mediterráneos.

➤ Objetivos y metodología

Se ha llevado a cabo un análisis histórico detallado de los cambios de uso del territorio en el municipio de Cáñar (Alpujarra granadina). Se han revisado las fuentes documentales desde 1568 hasta la actualidad (Figura 1), para recabar información acerca de la distribución de la vegetación y cultivos, usos del territorio, y demás variables que pueden estar relacionadas. Se han seleccionado una serie de variables

que permiten describir los cambios ocurridos en la dinámica socioeconómica del municipio y las consecuencias ecológicas de los mismos: población, uso del suelo (superficie de cultivo en regadío, en secano y superficie forestal), densidad arbórea, ganado ovino, uso apícola y sectores económicos (primario, secundario y terciario). Todas las variables se han recopilado a escala municipal a excepción de

las relacionadas con los sectores económicos que son de ámbito provincial. El rango temporal de cada variable difiere según la disponibilidad de datos. Posteriormente mediante una aproximación multidisciplinar se han inferido los cambios ocurridos en el uso del suelo y la dinámica de la vegetación (Figura 2).

➤ Resultados

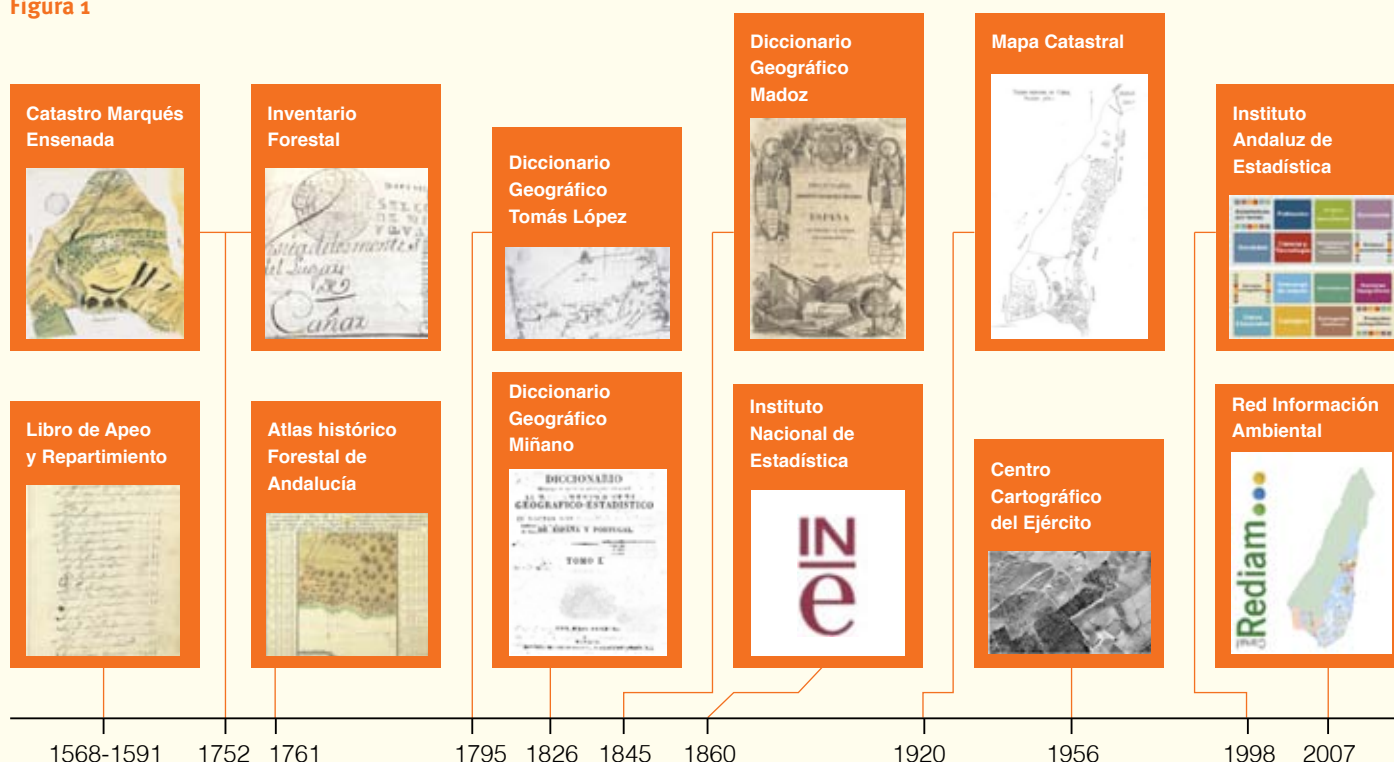
El trabajo de recopilación realizado nos permite reconstruir la evolución de una serie de variables socioeconómicas que están íntimamente relacionadas con los cambios observados en la estructura del paisaje y la vegetación. Estas relaciones se mantienen en la actualidad. Su descripción y análisis nos ayudarán a mejorar la forma en la que se manejan los recursos naturales en un contexto de cambio global. Desde la repoblación que llevaron a cabo los Reyes Católicos en 1571 tras la expulsión de los moriscos se produce un repunte continuado de la población hasta alcanzar el máximo a finales del siglo XIX. A partir de este momento el número de habitantes se mantiene con ciertas

oscilaciones hasta la década de 1960. Desde entonces y coincidiendo con la crisis de la montaña española [16] la población en Cáñar y resto de la Alpujarra comienza un descenso muy acusado.

La fecha de inicio del declive demográfico coincide con un descenso muy marcado en los aprovechamientos ganaderos y apícolas (Figura 2). Esta tendencia se mantiene hasta la actualidad. Los campos de cultivo abandonados han sido colonizados por formaciones de vegetación natural, observándose un aumento en la superficie forestal desde mediados del siglo XX hasta la actualidad.

Las tendencias anteriores también se muestran en indicadores económicos por sectores: el sector primario se reduce drásticamente. Mientras que en el resto de la provincia este declive se hace a favor del sector secundario y terciario, en el caso de Cáñar y la Alta Alpujarra tiene más relación con la emigración fuera de Granada (norte de España y extranjero).

Figura 1



Conjunto de fuentes documentales empleadas en el trabajo.

➤ Discusión y conclusiones

Los cambios en la población y sus costumbres han marcado la huella del hombre en Sierra Nevada. Estos cambios han provocado sucesivas alteraciones en los patrones de aprovechamientos de los recursos naturales y también de los usos del suelo. Los primeros datos de población disponibles datan de la época del levantamiento de los moriscos y la guerra posterior (1568-1571). En esta etapa se practicó por ambos bandos la técnica de “la tierra quemada” que consistía en la destrucción de las infraestructuras, que afectó gravemente a la compleja red de riego por acequias [17]. Este hecho sumado al desconocimiento de las técnicas de riego y careo por parte de los pobladores que vinieron y a su cultura cerealística y ganadera, provocó un abandono importante del regadío. En 1571 tras la expulsión de los moriscos se implantó una agricultura ex-

tensiva basada en cultivos herbáceos y se rotaron amplias zonas boscosas para ello [18].

Esta agricultura de secano se prolonga hasta finales de siglo XVIII cuando se produce un cambio de modelo agrícola. El riego vuelve a retomar el protagonismo a través de la sustitución del cultivo herbáceo por el viñedo. Se trata de una época donde aumenta significativamente la producción agrícola.

La actividad agrícola se intensifica desde finales del siglo XVIII hasta finales del XIX, cuando se exportan fuera de Cañar la seda y los productos elaborados en la fábrica de aguardiente y en cuatro molinos harineros [19]. En esta época, Cañar llega a su máximo poblacional (1.063 habitantes). A partir de ahí, la llegada de la filoxera

(plaga que afecta a la vid) y de la epidemia de cólera (1885), hicieron fluctuar a la población con fuertes emigraciones a Argentina y Brasil. La fuerte presión antrópica, traducida en roturación de espacios forestales, explotación de madera e incendios forestales provocaron la desaparición del 90% de la superficie ocupada por frondosas (encinares y robledales) que se presentaban en laderas medias y bajas [12]. La última tala masiva se produjo en 1930. Esta situación provocó unos procesos erosivos y continuas inundaciones que hicieron que las propias administraciones locales y los afectados reclamaran actuaciones que paliaran estas catástrofes continuas en el Guadalfeo desde 1860 [12]. Las primeras obras de reforestación comenzaron en 1929 en los ríos Sucio (Lanjarón) y Chico (Cañar y Soportújar) principalmente con

Pinus pinaster y *Pinus uncinata*. En la actualidad los pinares de repoblación son un elemento importante del paisaje.

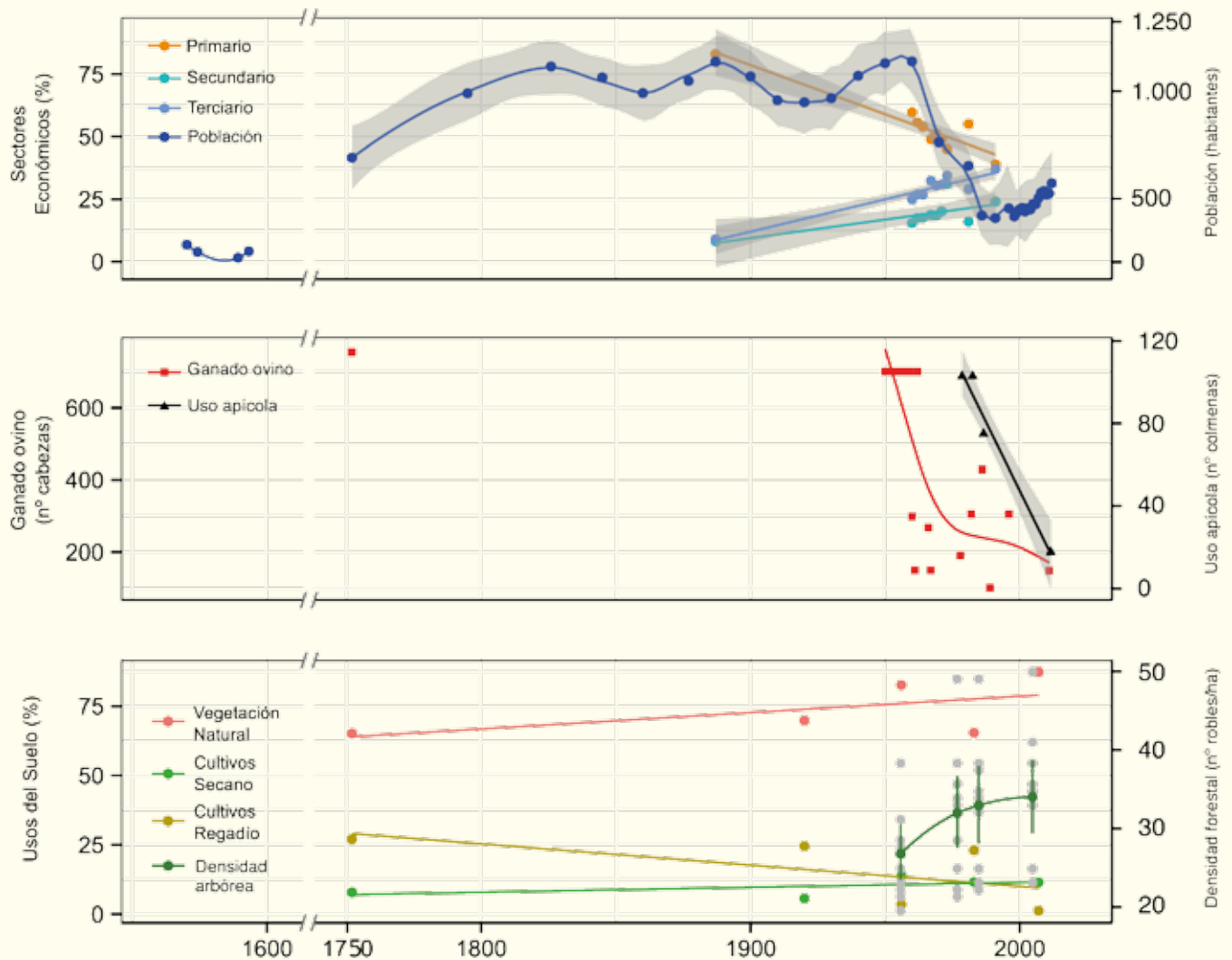
La situación de guerra y postguerra sufrida en España ayudó a mantener la población hasta finales de 1960, dada la dificultad de emigrar y la posibilidad de mantener una vida de subsis-

tencia a base de ganadería y agricultura [20].

A partir de esta fecha, se produce una fuerte emigración y abandono masivo de la agricultura y ganadería. Entre finales de los cincuenta hasta finales de los setenta se produce el abandono de las parcelas de cultivos más altas y menos accesibles. A partir de 1974

comienza el abandono de parcelas de laderas más bajas. Este abandono se modera en los años 80, donde nos encontramos con mucha frecuencia mosaicos de cultivos con parcelas abandonadas. Esta situación propicia que los encinares y robledales se regeneren en los campos abandonados. Por lo tanto, hay dos momentos en los que los cultivos herbáceos

Figura 2



Evolución de diferentes variables estudiadas desde 1568 hasta la actualidad.

dan paso a nuevas formaciones: a finales del siglo XVIII en cotas más bajas donde son sustituidos artificialmente por cultivos leñosos (viñedo en su mayoría) y a partir de 1957 donde lo que se produce es un abandono generalizado de los usos agroganaderos y un comienzo de la recolonización de los campos abandonados por la vegetación nativa.

En la Figura 2 podemos observar la coincidencia en el tiempo del aumento de la superficie forestal

con el abandono agrícola y ganadero. Otros usos similares como el apícola reflejan también el abandono del sector primario.

En las últimas dos décadas, coincidiendo con la declaración del Parque Natural, la población de Cañar comienza una leve recuperación. En esta época, en el valle del Poqueira (en gran parte por el auge del turismo) y en el río Chico, se ha visto renacer una cierta actividad ligada a la plantación de árboles frutales y su puesta en regadío [18].

Los resultados obtenidos no solo contribuyen a mejorar nuestra comprensión de la historia del territorio, sino que nos permiten conocer la situación del sistema a la hora de enfrentar los impactos del cambio global. Diversas funciones ecológicas clave para la generación de servicios ecosistémicos (producción de biomasa, creación de suelo, etc.) están condicionadas por el uso del suelo en el pasado.



Cultivos en la subida al Robledal de Cañar en los años 70.

3.5. Sistemas históricos de regadío y paisajes culturales de Sierra Nevada

Martín Civantos, J.M. y Bonet-García, M.T.
Universidad de Granada

Resumen

Los sistemas históricos de regadío y la gestión hidráulica son una de las principales señas de identidad de Sierra Nevada. Su construcción en época medieval ha marcado de manera indeleble no solo las formas de vida de los habitantes y de explotación de los recursos, sino también la transformación del paisaje de una montaña profundamente antropizada [21,25]. Estas redes de acequias son fundamentales no solo para la recarga de acuíferos de alta montaña, la creación de pastos y de los espacios de agricultura intensiva de regadío, sino también para el mantenimiento de la biodiversidad de este espacio de montaña a través de toda una serie de servicios ecosistémicos muy relevantes. Sin embargo, y a pesar del enorme impacto territorial, los miles de kilómetros de acequias, las terrazas de cultivo y las infraestructuras asociadas a ellas se encuentran hoy amenazados por la falta de rentabilidad en el contexto económico actual. La desaparición progresiva de formas de explotación tradicional y la caída progresiva de la renta agraria han ido ocasionando una marginalización, deterioro y abandono parcial de estos sistemas.

Figura 1



Representación gráfica de la estructura de una red de acequias típica de Sierra Nevada. Las acequias son estructuras diseñadas para extraer cierto porcentaje de caudal de un curso de agua natural (color azul). En el curso alto de un río esta agua se usa para regar laderas y fomentar tanto la infiltración del agua en los acuíferos como el crecimiento del pasto de montaña. Se trata de las llamadas acequias de careo (rojo). En las zonas bajas el agua de las acequias se usa para regar explotaciones agrarias extensivas propias del mediterráneo (huertos, en naranja).

➤ Objetivos y metodología

Desde 2010 hasta 2014 se han estudiado los sistemas de regadío de montaña de Sierra Nevada gracias a la financiación del Organismo Autónomo de Parques Nacionales. La metodología de estudio ha sido compleja y ha incluido desde la prospección hidráulica [21, 22] para la documentación y cartografiado de los sistemas de acequias hasta la encuesta etnográfica con los acequeros y personas conocedoras de los mismos y de las formas

tradicionales de explotación agraria. La cartografía se ha realizado mediante GPS en campo, además del uso de ortofotografías, incluyendo, cuando ha sido posible, la cartografía histórica. Toda esta documentación ha sido almacenada en una base de datos relacional y geográfica e implementada sobre una plataforma informática creando un sistema de información geográfica. El trabajo ha incluido un vaciado documental y bibliográfico (se han

consultado el Archivo histórico provincial, archivos municipales, portales web de cartografía histórica como el Catálogo digital de Cartografía Histórica de la Junta de Andalucía, documentación aportada por las propias comunidades de regantes, etc.); el análisis toponímico e incluso la excavación de varios bancales para el estudio de la dinámica de suelos y la formación de los sistemas de terrazas de cultivo.

➤ Resultados

El resultado más llamativo del trabajo desarrollado es la documentación y cartografiado de algo más de 2.000 km de acequias en Sierra Nevada y su entorno inmediato (para ello se ha integrado información ya existente procedente de otros proyectos). Son, sin embargo, una pequeña parte de los que existen y aún es necesario estudiar. Para hacernos una idea del número de acequias existentes en el Parque de Sierra Nevada y los municipios que lo conforman podemos hacer unas estimaciones aproximadas en función de los datos que ya poseemos. Durante este estudio se han documentado solo en el municipio de Ferreira 423 acequias que suponen 117 km lineales de canales de irrigación, incluyendo la vega y las tierras de campo (de riego eventual) extendiéndose por el municipio que ocupa una superficie de 43,5 km². Si extrapolamos estas cifras a la superficie total de los municipios del Marquesado del Zenete (Aldeire, Alquife, Dólar, Huéneja, Jérez del Marquesado, Lanteira y La Calahorra) que suman 452 km², obtendríamos unos 1.215 km de acequias. Otro ejemplo para la vertiente sur de Sierra Nevada podemos tomarlo con los sistemas de riego que se abastecen del río Monachil, en los municipios de Monachil, La Zubia, Huétor Vega y Cájara, que ocupan una superficie de 114,7 km², donde hemos contabilizado 300 km de acequias (la Figura 1 muestra un esquema con la distribución de estas acequias). Si volvemos a extrapolar estas cifras para los municipios de la vertiente sur de Sierra Nevada (Bubión, Busquístar, Cáñar, Capileira, Sopórtujar, Pampaneira, Pórtugos, La Tahá y Trevélez), que ocupan unos 285 km² obtendríamos unos 745 km de acequias. Otro dato importante a tener en cuenta a la hora de analizar los sistemas de riego y su evolución



Acequia tradicional en Sierra Nevada.

actual es que de las más de 3.700 acequias que hemos digitalizado, aproximadamente 640 están abandonadas o han desaparecido. Es decir, estimamos que hay en torno a 2.000 Km de acequias en Sierra Nevada. El porcentaje de acequias abandonadas se estima en torno al 15-20% del total.

Solamente el dato de la extensión nos da una idea del impacto paisajístico, ambiental y territorial de estas infraestructuras y de los agrosistemas ligados a ellas. Se trata de un complejo sistema de aprovechamiento no solo del agua, sino también de suelos, pastos, monte y, por supuesto, de manejo de cultivos y animales. La distribución de parte del caudal natural de los ríos al sistema de acequias podría provocar cambios tanto en los ecosistemas acuáticos como en los terrestres (regados por el agua de las acequias). El cartografiado de la red de acequias aporta una información muy valiosa

para cuantificar el efecto de dicha red en el ciclo hidrológico (a través de su inclusión en modelos hidrológicos, por ejemplo). El conocimiento de la distribución de las acequias también permitirá diseñar futuros trabajos para evaluar el efecto ecológico de las mismas.

La actividad agrícola principal en Sierra Nevada ha sido tradicionalmente la agricultura intensiva de regadío. Se trata de una opción social, tal vez no la más “lógica” en un espacio de montaña y alta montaña. Esta opción tiene sus raíces históricas en la conquista árabo-beréber del siglo VIII, momento en el que empiezan a extenderse las redes de acequias en Sierra Nevada [23]. Dichas redes incluyen los mecanismos de recarga artificial del acuífero superficial de la alta montaña y de recarga de simas, así como la creación de las vegas en las cotas bajas. Conocer con detalle la distribución de las acequias nos permite comprender mejor estos aspectos

hidrológicos que tienen gran relevancia a escala local y de paisaje.

El área de influencia del Parque de Sierra Nevada resulta ser mucho mayor si tenemos en cuenta los servicios que prestan los sistemas hidráulicos, entre otros, el de recarga de acuíferos de alta montaña y de aluvión en las zonas llanas que rodean a la Sierra, así como el de abastecimiento agrícola en las vegas de zonas ya muy alejadas en Guadix, Granada, Delta del Guadalfeo o Almería. Gracias al trabajo realizado es posible identificar las conexiones hidrológicas entre la montaña y las áreas bajas agrícolas adyacentes.

Así pues, a través de estos sistemas de explotación se puede rastrear una parte importante de la Historia de Sierra Nevada, sus poblaciones y comprender la formación de sus paisajes y las lógicas que los rigen.

➤ Discusión y conclusiones

Las comunidades de regantes han sido históricamente las responsables de la gestión del agua y de estos espacios productivos, llevando a cabo una tarea ingente desde el punto de vista productivo, ambiental y social [24]. Actualmente se encuentran en proceso de envejecimiento y de crisis por la falta de recambio generacional y por los cambios en las formas de vida del ámbito rural. El marco económico actual y la continuada crisis de la renta agraria hacen que esta agricultura no sea competitiva en términos de mercado ni posibilita la integración de jóvenes agricultores que puedan vivir de las actividades primarias.

Los saberes campesinos asociados a los manejos de los sistemas hidráulicos y los cultivos y la ganadería de montaña, se encuentran en un acelerado proceso de desaparición que es necesario frenar en la medida de lo posible.

Desde el propio Espacio Natural de Sierra Nevada se ha tomado conciencia en los últimos años de la importancia de la gestión antrópica de los recursos y de su papel en el mantenimiento de la biodiversidad y los paisajes. El proyecto desarrollado para la recuperación de un buen número

de acequias de careo en las zonas altas de Sierra Nevada es un ejemplo claro de ello. Sin embargo, los problemas relacionados con la crisis de la agricultura tradicional resultan muy complicados de afrontar y gestionar. La falta de competitividad en un mercado globalizado solo puede suplirse mediante la apuesta por la calidad ambiental y social y cambios en los modelos de gestión y comercialización. Para ello, se podrían proponer algunas acciones de carácter general:

- Seguir estudiando estos sistemas para mejorar y planificar su gestión, así como para difundir sus valores.
- Plan de fomento de la actividad agraria sostenible desde la perspectiva ambiental y social, que potencie los usos tradicionales de los recursos, especialmente el agua, a través de los sistemas de careo y recarga de acuíferos, la generación de pastos y zonas de cultivo de alta montaña y los espacios de riego intensivo.
- Fomento del diálogo entre las autoridades del Espacio Natural de Sierra Nevada y las comunidades rurales, especialmente las

comunidades de regantes, para la conciliación de los objetivos de conservación y de los usos sociales del territorio.

- Plan de difusión de los valores de los sistemas de regadío a la ciudadanía en general como uno de los elementos distintivos más importantes del Espacio Natural de Sierra Nevada y ejemplo de las formas de relación histórica del ser humano con el medio natural en el contexto de cambio global.
- Acción para la defensa de los derechos históricos de usos de agua de las comunidades de regantes frente a la Directiva Europea de Aguas y Ley Andaluza de Aguas, buscando siempre un equilibrio que garantice la continuidad de los usos tradicionales del agua y de los paisajes que históricamente han generado.



3.6. La importancia de los usos del suelo pasados en la regeneración natural de quercíneas bajo repoblaciones de coníferas

Pérez-Luque, A.J.; Navarro, I.; Bonet, F.J. y Zamora, R.

Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía, Universidad de Granada

Resumen

La regeneración natural bajo repoblaciones forestales depende del grado de degradación del sitio, la proximidad a las fuentes semilleras, la disponibilidad de dispersores y de las características intrínsecas de las plantaciones (densidad, altitud, radiación, etc.). Sin embargo, hasta la fecha, ningún trabajo ha analizado explícitamente la influencia simultánea del uso del suelo en el pasado y de los factores ecológicos en la regeneración del bosque autóctono en repoblaciones forestales. Esto es de gran importancia en ecosistemas mediterráneos que han estado sometidos a una larga historia de intervención humana, como ocurre en Sierra Nevada. En este trabajo se ha analizado la regeneración natural de *Quercus* en repoblaciones de coníferas en función del uso del suelo en el pasado y de factores ecológicos. Los resultados obtenidos indican que el uso del suelo en el pasado tiene más importancia en la regeneración natural que la distancia a la fuente semillera y la densidad de la plantación. De hecho, existe un gradiente de regeneración natural en función del gradiente de intensidad de uso en el pasado: a mayor intensidad de uso en el pasado (cultivos) menor regeneración natural se observa en la actualidad y viceversa. Estos resultados ponen de relieve la importancia de considerar el uso del suelo en el pasado cuando se valore el potencial de recuperación de vegetación autóctona en las plantaciones de pinos.

➤ Objetivos y metodología

La hipótesis de partida es que la regeneración del bosque natural en las repoblaciones forestales depende en gran medida del uso del pasado (*legacies*) anterior al establecimiento de la repoblación. En este sentido, se pretende comprender la importancia del uso del suelo y de factores ecológicos en la regeneración natural. Para ello se ha analizado la cantidad de regeneración natural de quercíneas en pinares de repoblación en función del uso del suelo

en 1956 y de factores ecológicos: densidad de la repoblación y distancia a la fuente semillera [26, 29]. Se seleccionaron 168 parcelas, procedentes del inventario forestal de Sierra Nevada (*Sinfonevada*, [27]), que presentaban una cobertura arbórea de pinos superior al 75 % y localizadas por debajo de 1.900 msnm (límite fisiológico para quercíneas). Mediante fotointerpretación se asignó a cada parcela su uso del suelo en 1956. Se establecieron cuatro

niveles (gradiente de intensidad de uso): bosques de quercíneas, matorrales, pastos y cultivos. La distancia a la fuente semillera se calculó como la distancia media de cada parcela a la fuente semillera en 1956 y en la actualidad. Para determinar la contribución de cada factor (usos del suelo en 1956; densidad de la plantación y distancia a fuente semillera) a la regeneración natural se llevaron a cabo modelos individuales y combinados.

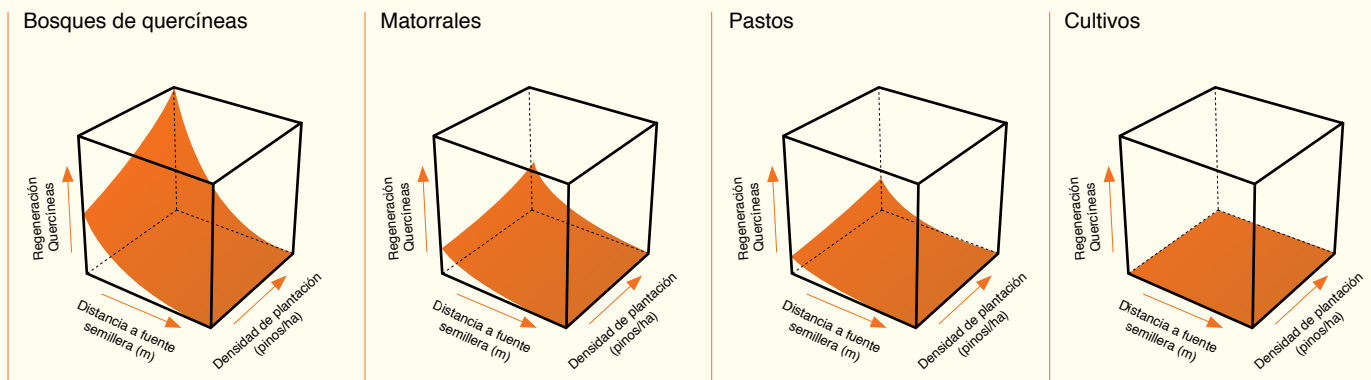
➤ Resultados

El modelo que mejor explica la regeneración natural es aquel que incluye todos los factores analizados (modelo completo): usos del suelo en 1956, distancia a fuente semillera y densidad del pinar. El análisis de los modelos individuales mostró que el tipo de uso en 1956 es el factor que mejor explica la regeneración natural bajo pinares de repoblación [29, 30].

La probabilidad de encontrar regeneración es mayor en las parcelas que eran monte de quercíneas en el año 1956, que en aquellas parcelas

que presentaban otro tipo de uso (matorrales, pastos y cultivos). Por otro lado, la densidad de regenerados (número de plántulas por m²) está muy influenciada por el tipo de uso de suelo en 1956. A valores óptimos de densidad de pinos (ver [26]) y a distancia cero de la fuente semillera, los valores esperados de regeneración de quercíneas fueron de 0,01 plántulas/m² para parcelas que en 1956 eran cultivos (mas degradado), 0,11 plántulas/m² si eran pastos, 0,17 plántulas/m² para aquellas que eran matorrales y 0,38 plántulas/m² cuando eran encinares

(menos degradado) (Figura 1). La distancia a la fuente semillera afecta significativamente tanto a la probabilidad de encontrar regeneración natural bajo los pinares como a la abundancia de regenerado. Los valores esperados de regeneración disminuyen exponencialmente con la distancia a la fuente semillera (Figura 1). Por otro lado, la densidad de los pinares influye significativamente en la cantidad de regenerado natural que encontramos (Figura 1).

Figura 1

Regeneración natural de quercúneas bajo pinares de repoblación en función del tipo de uso de suelo en el pasado (uso en 1956: bosques de quercúneas, matorrales, pastos y cultivos), de la distancia al fuente semillero y de la densidad de la repoblación forestal.

➤ Discusión y conclusiones

Se han identificado diversos factores ecológicos que afectan a la regeneración natural bajo repoblaciones de coníferas [26, 28], como la proximidad a la fuente semillero, las características internas de plantación (densidad, altitud, radiación, heterogeneidad espacial). Sin embargo ningún trabajo hasta la fecha ha puesto de manifiesto la importancia del uso del pasado en la regeneración natural. Nuestros resultados indican que la regeneración natural en repoblaciones forestales depende más del tipo de uso de suelo

en el pasado que de factores ecológicos. Además se ha encontrado un gradiente de regeneración que coincide con el gradiente de intensidad de uso, o dicho de otro modo, la intensidad de uso en el pasado afecta a la regeneración natural en el presente.

Estos resultados indican que el peso del pasado (usos del suelo) determina en gran medida la regeneración natural bajo pinares, aparte de otros factores ecológicos como las condiciones

abióticas, estructura del paisaje y la composición de la vegetación [26, 28]. En este sentido, las actuaciones de gestión en repoblaciones de coníferas han de tener en cuenta no solo los factores ecológicos actuales de las repoblaciones, sino también el uso anterior al establecimiento de la repoblación.



Regeneración de roble melojo (*Quercus pyrenaica*) bajo pinares de repoblación.

Bibliografía

➤ Más referencias en http://refbase.iecolab.es/ref_dossier_resultados.html

3.1 Reconstrucción de la vegetación a partir del análisis palinológico

- [1] Anderson, R.S.; Jiménez-Moreno, G.; Carrión, J.S. & Pérez-Martínez, C. (2011). Postglacial history of alpine vegetation, fire, and climate from Laguna de Río Seco, Sierra Nevada, southern Spain. *Quaternary Science Reviews*, 30: 1615–1629.
- [2] Jiménez-Moreno, G. & Anderson, R.S. (2012). Holocene vegetation and climate change recorded in alpine bog sediments from the Borreguiles de la Virgen, Sierra Nevada, Southern Spain. *Quaternary Research*, 77: 44–53.
- [3] Jiménez-Moreno, G.; García-Alix, A.; Hernández-Corbalán, M.D.; Anderson, R.S. & Delgado-Huertas, A. (2013). Vegetation, fire, climate and human disturbance history in the southwestern Mediterranean area during the late Holocene. *Quaternary Research*, 79 (2): 110–122.
- [4] Pons, A. & Reille, M. (1988). The holocene and upper pleistocene pollen record from Padul (Granada, Spain): A new study. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 66 (3-4): 243–263.
- [5] Fernández, S.; Fuentes, N.; Carrión, J.S.; González-Sampériz, P.; Montoya, E.; Gil, G.; Vega-Toscano, G. & Riquelme, J.A. (2007). The Holocene and Upper Pleistocene pollen sequence of Carihuela Cave, southern Spain. *Geobios*, 40 (1): 75–90.

3.2 Análisis de indicadores paleolimnológico en las lagunas de Sierra Nevada

- [6] Battarbee, R.W.; Jones, V.J.; Flower, R.J.; Cameron, N.G.; Bennion, H.; Carvalho, L. & Juggins, S. (2001). *Diatoms*. Pp: 155-202. En: Smol, J.P., Birks, H.J.B., Last, W.M. (Eds.), *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments, Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators*, vol. 3. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- [7] Michelutti, N.; Wolfe, A. P.; Vinebrooke, R. D.; Rivard, B. & Briner, J. (2005). Recent primary production increases in Arctic lakes. *Geophysical Research Letters* 32, L19715.
- [8] Smol, J.P. & Douglas, M. S. V. (2007). From controversy to consensus:

Making the case for recent climatic change in the Arctic using lake sediments. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5: 466–474.

- [9] Rühland, K.M.; Paterson, E.M.; Hargan, K.; Jenkin, A.; Clark, B.J. & Smol, J.P. (2010). Reorganization of algal communities in the lake of the woods (Ontario, Canada) in response to turn-of-the-century damming and recent warming. *Limnology and Oceanography*, 55 (6): 2433–2451.
- [10] Sorvari, S.; Korhola A. & Thompson, R. (2002). Lake diatom response to recent arctic warming in finnish lapland. *Global Change Biology*, 8: 171–181.

3.3 Evolución de los usos del suelo en Sierra Nevada en los últimos 50 años y cambios en el paisaje

- [11] Jiménez Olivencia, Y.J. & Porcel Rodríguez, L. (2008). Metodología para el estudio evolutivo del paisaje: aplicación al espacio protegido de Sierra Nevada. *Cuadernos Geográficos*, 43: 151–179.
- [12] Jiménez Olivencia, Y. (1991). *Los paisajes de Sierra Nevada: cartografía de los sistemas naturales de una montaña mediterránea*. Monografía Tierras del Sur. Universidad de Granada.
- [13] Jiménez Olivencia, Y.; Porcel Rodríguez, L. & Píñar Álvarez, A. (2010). *Evolución histórica de los paisajes del Parque Nacional de Sierra Nevada y su entorno*. Pp: 109-128. En: Ramírez, L. & Asensio, B. (Eds.) *Proyectos de investigación en Parques Nacionales: 2006-2009*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Madrid.
- [14] Alario, M.; Baraja, E. & Silva, R. (2011). *Medio siglo de transformaciones agrarias en España. Factores económicos, sociales y políticos como clave de la dinámica de los paisajes agrarios*. Pp: 127-142. En: Molinero, F.; Ojeda, J.F. & Tort, J. (Eds.) *Los paisajes agrarios de España. Caracterización, evolución y tipificación*. Ministerio de Medio Ambiente Rural y Marino. Madrid, 127–142.
- [15] Lasanta-Martínez, T.; Vicente-Serrano, S.M. & Cuadrat-Prats, J.M. (2005). Mountain Mediterranean landscape evolution caused by the abandonment of traditional primary activities: a study of the Spanish Central Pyrenees. *Applied Geography*, 25 (1): 47–65.

3.4 Análisis histórico de los cambios socio-ecológicos en el municipio de Cañar (Alpujarra de Sierra Nevada)

- [16] Collantes, F. (2001). El declive demográfico de la montaña española, 1860-1991: revisión crítica de propuestas teóricas. *Historia Agraria*, 24: 203–225.
- [17] Bañuelos, A. (2008). Repoblación y demografía del concejo de Cástaras y Nieles. En: *Cuadernos Culturales de Cástaras y Nieles nº 4*. Asociación Cultural de Cástaras y Nieles.
- [18] Camacho Olmedo, M.T.; García Martínez, P.; Jiménez Olivencia, Y.; Menor Toribio, J. & Paniza Cabrera, A. (2002). La transformación de un paisaje de montaña: el proceso de abandono de la agricultura en la Alta Alpujarra granadina. Pp: 547-559. En: *Los espacios rurales entre el hoy y el mañana*. XI Coloquio de Geografía Rural. AGE. Universidad de Cantabria.
- [19] Madoz, P. (1846). *Diccionario geográfico-estadístico-histórico de España y sus posesiones de ultramar*.
- [20] García Martínez, P. (1999). *Transformación del paisaje y la economía rural en la montaña mediterránea andaluza: la alta Alpujarra occidental*. Granada. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Granada.

3.5 Sistemas históricos de regadío y paisajes culturales de Sierra Nevada

- [21] Barceló, M. (1989). *El diseño de los espacios irrigados en al-Andalus: un enunciado de principios generales*. En: El agua en las zonas áridas. Arqueología e Historia. Actas del I Coloquio de Historia y Medio Físico, Almería, 14-16 de Diciembre. Almería.
- [22] Kirchner, H. & Navarro, C. (1993). Objetivos, métodos y práctica de la Arqueología Hidráulica. *Archeologia Medievale*, 20: 159-182.
- [23] Martín-Civantos, J.M. (2007). *Poblamiento y territorio medieval en el Zenete (Granada)*. Editorial Universidad de Granada, 773 pp.
- [24] Martín-Civantos, J.M. (2011). *Archaeology of medieval irrigated spaces in south-east Spain*. Pp: 11-29. En: VIIIth Ruralia International Conference: Processing, storage, distribution of food – Food in the medieval rural environment. Bélgica.
- [25] Trillo San José, M.C. (1994). *La Alpujarra antes y después de la conquista castellana*. Editorial Universidad de Granada, 500 pp.

3.6 La importancia del pasado en la regeneración natural bajo repoblaciones de coníferas

- [26] Gómez-Aparicio, L.; Zavala, M.A.; Bonet, F.J. & Zamora, R. (2009). Are pine plantations valid tools for restoring Mediterranean forests? An assessment along abiotic and biotic gradients. *Ecological Applications*, 19 (8): 2124–2141.
- [27] Pérez-Luque, A.J.; Bonet, F.J.; Pérez-Pérez, R.; Aspizua, R.; Lorite, J. & Zamora, R. (2014). Sinfonevada: Dataset of Floristic diversity in Sierra Nevada forests (SE Spain). *PhytoKeys*, 35: 1–15.
- [28] González-Moreno, P.; Quero, J.L.; Poorter, L.; Bonet-García, F.J. & Zamora R. (2011). Is spatial structure the key to promote plant diversity in Mediterranean forest plantations?. *Basic and Applied Ecology*, 12 (3): 251–259.
- [29] Navarro-González, I.; Pérez-Luque, A.J.; Bonet, F.J. & Zamora, R. (2013). The weight of the past: Land-use legacies and recolonization of pine plantations by oak trees. *Ecological Applications*, 23 (6): 1267–1276.
- [30] Navarro-González, I.; Pérez-Luque, A.J.; Bonet, F.J. & Zamora, R. (2014). The Weight of the Past. *Bulletin of the Ecological Society of America*, 95 (2): 64–67.

Impactos del cambio global en los ríos y lagos de montaña

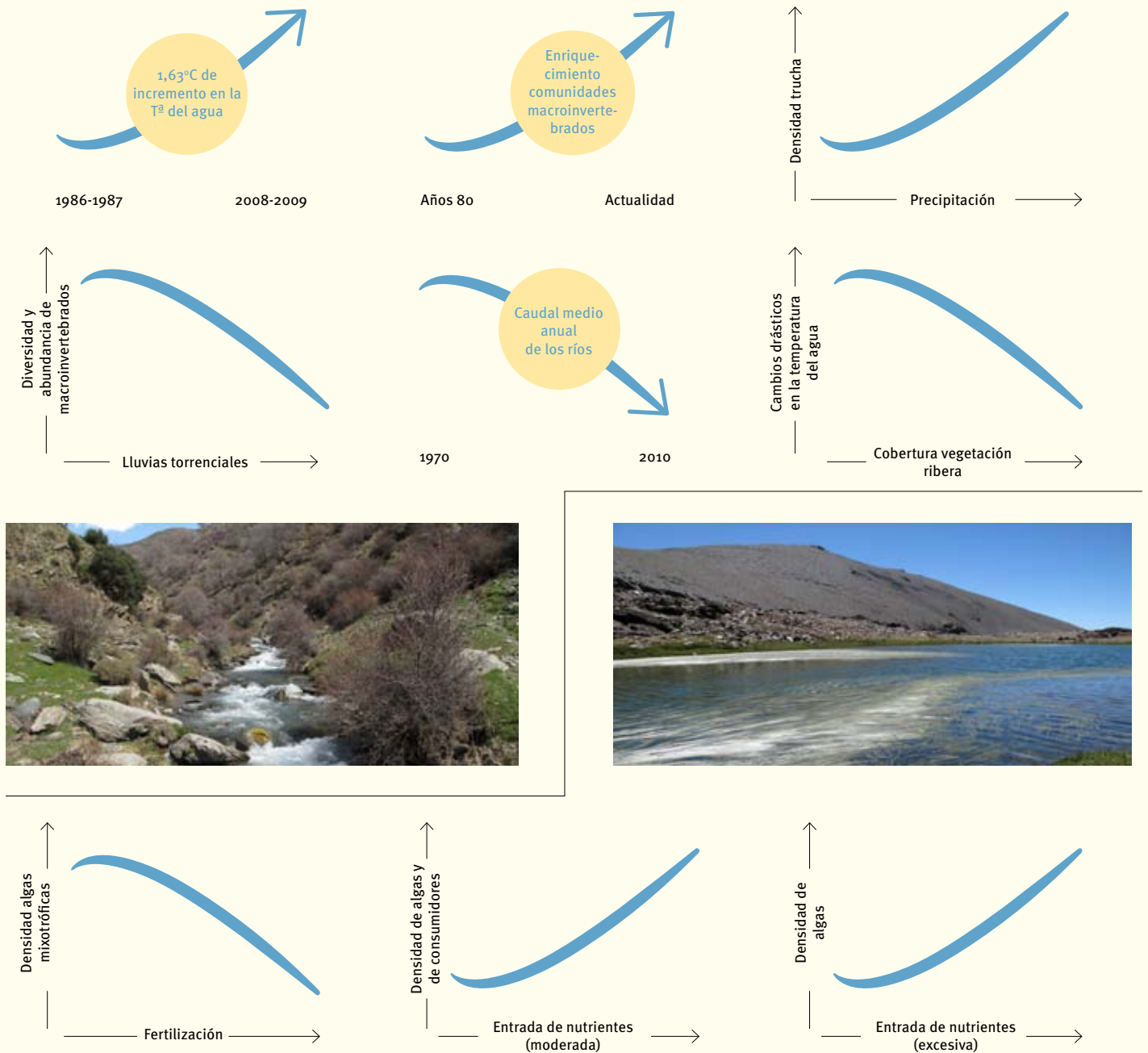
Los sistemas acuáticos de Sierra Nevada constituyen ambientes extremadamente sensibles a los cambios ambientales. La comparación de la temperatura del agua de los ríos (muy correlacionada con la temperatura del aire) en dos períodos separados por 20 años (1984-1987 y 2008-2009) en un conjunto representativo de localidades muestra un incremento de 1,63°C. Este calentamiento progresivo de los sistemas acuáticos también se ve potenciado por un paulatino deterioro de la vegetación de ribera, que provee a estos ambientes riparios de una barrera que amortigua las oscilaciones térmicas. Estos cambios tienen repercusiones de suma importancia sobre los procesos físico-químicos y las comunidades biológicas de los ríos. El estudio comparativo de la situación de las comunidades de macroinvertebrados de Sierra Nevada en los años 80 y en la actualidad muestra cambios sustanciales. Determinadas especies que en los

años 80 se asociaban a los tramos medios han ascendido a cotas superiores. Como resultado, la diversidad de especies en los tramos de alta montaña es ahora mayor que hace treinta años. En aquellas localidades donde la temperatura del agua ha sufrido más cambios, se ha producido también un mayor incremento en la diversidad de tricópteros. En el caso particular de los plecópteros, se ha comprobado que los límites de distribución inferiores de determinadas especies se han contraído, mientras que no ha cambiado su distribución en los límites superiores.

Otro organismo asociado a los sistemas acuáticos de montaña cuyas poblaciones están siendo afectadas por el cambio global es la trucha común. Sierra Nevada alberga las poblaciones de trucha común más abundantes de toda Andalucía. El seguimiento que se ha realizado

durante los últimos nueve años nos ha permitido establecer una relación clara entre el caudal de los ríos y la abundancia de truchas. No obstante, se ha observado que la respuesta poblacional de las truchas a las variaciones en el caudal de los ríos no es inmediata, sino que presenta un retardo de dos años. Es decir, ante un año de sequía, la población de truchas disminuirá durante los dos años siguientes, mientras que ocurrirá el proceso inverso tras un año lluvioso. Del mismo modo, los datos recabados también han podido constatar el efecto nocivo de las lluvias torrenciales sobre la disminución de las poblaciones de trucha común. En cualquier caso, la recuperación de las poblaciones tras las avenidas se produce de manera inmediata.

Las cumbres de Sierra Nevada están salpicadas de lagunas de origen glaciar. En total son 74 lagunas de diferente tamaño, que se comportan



Resumen gráfico de los principales resultados descritos en el presente capítulo (arriba: ríos y abajo: lagunas). Se muestran tendencias temporales de variables biofísicas (gráficas con flechas) y relaciones entre variables (gráficas con ejes).

como auténticos centinelas del cambio global. Así lo demuestran más de cuarenta años de estudio de las lagunas glaciares de Sierra Nevada en los que se evidencia que estos ecosistemas son extremadamente sensibles a anomalías climáticas, a incrementos de la radiación ultravioleta y a la deposición de polvo atmosférico procedente del desierto del Sáhara (ver capítulos 9 y 10). En el presente capítulo se exponen

algunos de los estudios a largo plazo llevados cabo en la Laguna de la Caldera, que permiten establecer vínculos entre el cambio global y la pérdida de diversidad taxonómica y funcional en las lagunas de alta montaña de Sierra Nevada. Un ejemplo de ello lo constituyen las algas mixotróficas (presentan modalidad mixta de nutrición: capacidad fototrófica y heterotrófica), que se verían seriamente afectadas, causando

el colapso de la red microbiana heterotrófica. La fertilización, que tiene lugar en forma de aportes de fósforo y otros nutrientes procedentes de deposiciones de polvo sahariano, también afectaría a niveles superiores de la cadena trófica, provocando un descenso en la cantidad de zooplacton herbívoro.

4.1. Seguimiento de factores físico-químicos y caudales en los ríos de Sierra Nevada

Fajardo-Merlo M.C.¹; Sáinz-Bariáin, M.²; Zamora-Muñoz, C.²

¹ Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía ² Universidad de Granada

Resumen

Los ecosistemas acuáticos son totalmente dependientes de las condiciones ambientales que les rodean, por lo que los efectos del cambio global alterarán sus ciclos térmico e hídrico, poniendo en peligro el delicado equilibrio de estos sistemas y de los organismos que en ellos habitan. Por ello, se ha hecho un análisis retrospectivo de los cambios ambientales que más repercusión tienen sobre los medios acuáticos, para así poder afrontar nuevas medidas para su conservación futura.

> Objetivos y metodología

Para el seguimiento ecológico y químico de los ríos, se han medido de forma puntual en cada una de las épocas de muestreo (primavera, verano y otoño) una serie de parámetros físico-químicos (pH, conductividad, oxígeno disuelto y temperatura) en 23 localidades repartidas en 8 ríos. Además, para el seguimiento de la temperatura de forma continua se instalaron en 2009 sensores en 10 localidades, los cuales han continuado tomando datos hasta 2014. De igual manera, en 2009 se instalaron sensores para medir la temperatura del agua en cuatro lagunas de alta montaña (La Caldera, Laguna Larga, Río Seco y Aguas Verdes), y variaciones

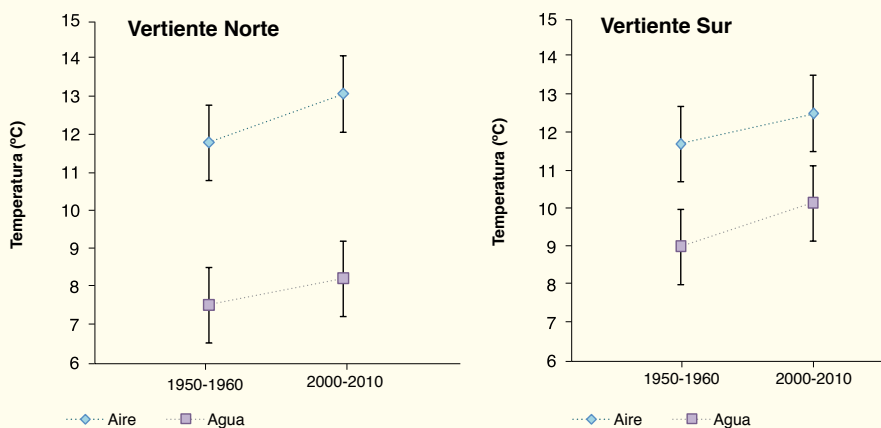
en el nivel de la lámina de agua medidas a través de la presión hidrostática en tres de ellas (La Caldera, Laguna Larga y Río Seco). Para el seguimiento de caudales, éstos se midieron puntualmente en las diferentes visitas, además de utilizar los datos publicados por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX del Ministerio de Medio Ambiente (<http://hercules.cedex.es/general/default.htm>) de las estaciones de aforo pertenecientes a la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. En el caso de los datos de temperatura del aire, éstos proceden de la Red de Información Ambiental de Andalucía.

> Resultados

Al comparar la temperatura media del aire en dos ríos situados en ambas vertientes de Sierra Nevada entre dos décadas con un intervalo de tiempo de 50 años (1950-1960, 2000-2010) se ha detectado un aumento de 1,5 °C (Figura 1), lo que debe haber tenido una clara repercusión en la temperatura media del agua de ríos y arroyos. Se ha correlacionado la temperatura del aire con la del agua en estas dos localidades de muestreo y, como era de esperar, dicha correlación entre ambas variables es positiva y significativa (Figura 2). Con las funciones de correlación obtenidas, se ha estimado un incremento de la temperatura media del agua entre décadas anteriores y la actual en más de 0,5°C. También se ha comparado la temperatura del agua en dos periodos de estudio separados por un intervalo de 20 años (1984-1987, 2008-2009) en 19 localidades que abarcaron todo el perímetro de Sierra Nevada, detectándose un aumento de la temperatura media de 1,63°C (Figura 3) observándose un mayor efecto en los ríos situados en la vertiente sur.

Un factor importante a tener en cuenta respecto a las oscilaciones térmicas del agua a lo largo del día es la presencia de vegetación ribereña [1], como se ha visto al comparar dos localidades del río Andarax con y sin vegetación de ribera debido a la altitud. Las oscilaciones térmicas se vieron amortiguadas hasta en 4°C en el periodo estival en la estación con vegetación de ribera (la más baja).

Figura 1



Los intervalos muestran el valor medio y el IC de la media al 95%, tanto para la temperatura del aire como la del agua, para los ríos Alhorí (cara Norte) y Trevélez (Cara Sur).

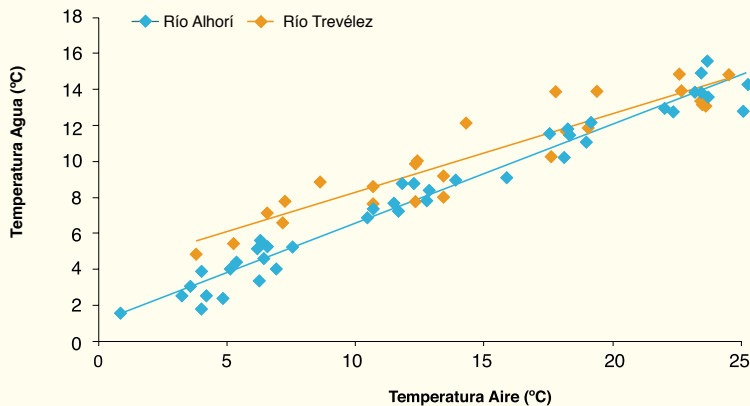
Al analizar los datos recopilados en relación a caudales (medias anuales), la tendencia en los últimos años ha sido ligeramente descendente para tres de los cuatro ríos analizados (Alhorí, Dílar, Genil y Monachil) (Figura 4).

En el caso de las lagunas de alta montaña, se ha detectado para Laguna Larga una inversión

térmica durante el periodo invernal, la cual perdura mientras lo hace la capa de hielo de la superficie, comenzando a desaparecer con la primavera debido al calentamiento de la superficie de la laguna, lo que provoca que la temperatura descienda bruscamente en toda la columna de agua debido a la influencia del agua de deshielo. Durante el periodo estival,

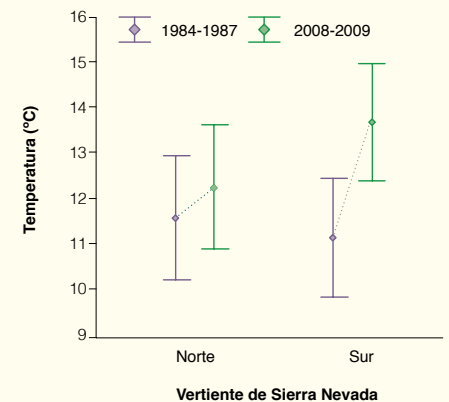
la luz solar aumenta la temperatura del agua superficial, siendo algo más fría a más profundidad sin llegar a tener una estratificación térmica marcada, ya que se forma una capa más o menos homogénea por la influencia del viento en la superficie [2].

Figura 2



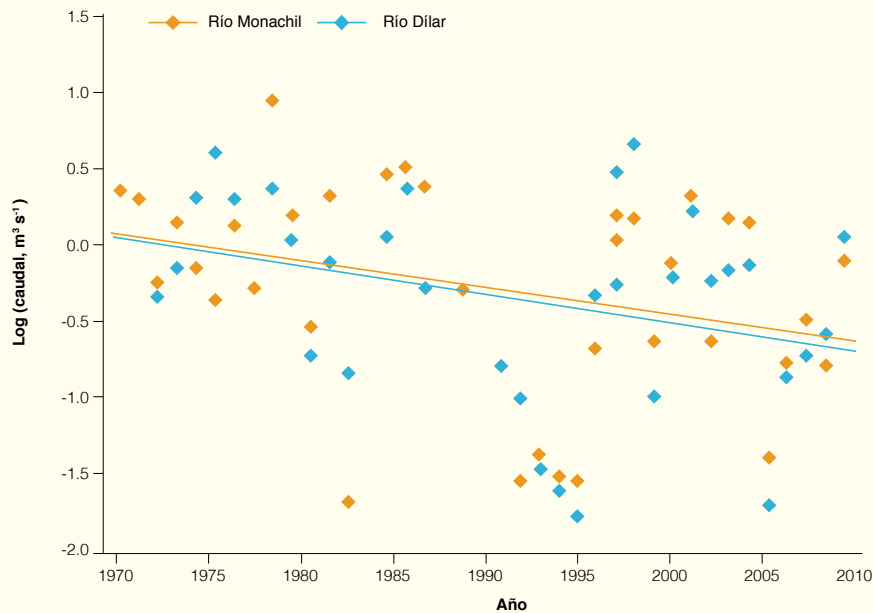
Regresión lineal entre la temperatura media mensual del aire y del agua para los ríos Alhorí (Cara Norte) y Trevéz (Cara Sur) (Alhorí $R^2 = 0.966$, Trevéz $R^2 = 0.898$).

Figura 3



Media ($\pm$ IC del 95%) de la temperatura en los dos periodos de estudio, 1984-1987 y 2008-2009, tanto en la vertiente norte como sur de Sierra Nevada.

Figura 4



Tendencia de los caudales medios anuales (expresados en logaritmos) para los ríos Dílar y Monachil en los últimos años.

➤ Discusión y conclusiones

El futuro de los ecosistemas acuáticos tal y como los conocemos es incierto debido a los efectos que el cambio global pueda tener sobre ellos. Por un lado la vegetación de ribera se ha visto mermada debido a la actividad humana; por otro el aumento de la temperatura del aire, con la directa repercusión sobre la temperatura del agua,

y cuya relación es tanto mayor cuanto menor es el caudal [3]; y por último, el descenso paulatino de los caudales en las últimas décadas, están dando lugar a cambios en el régimen térmico de los ríos y arroyos de Sierra Nevada. Todos estos factores repercuten a su vez tanto en los procesos físico-químicos del agua como en las

comunidades biológicas que en ellos habitan. Por tanto es de especial interés intensificar el control y la regulación de los recursos hídricos, con el fin de minimizar los efectos negativos que el cambio global pueda producir en estos ecosistemas.



Curso alto del río Dílar.

4.2. Cambios en la riqueza, abundancia y composición de las comunidades de invertebrados bentónicos

Sáinz-Bariáin, M.¹; Fajardo-Merlo, M.C.²; Zamora-Muñoz, C.¹

¹ Universidad de Granada ² Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía

Resumen

Los ecosistemas acuáticos y las comunidades de invertebrados bentónicos que en ellos habitan son claramente susceptibles de sufrir los efectos de cambios ambientales. En el estudio realizado en los ríos del macizo de Sierra Nevada se han detectado cambios tanto temporales como espaciales en dichas comunidades. Se observaron alteraciones locales a corto plazo en la comunidad de invertebrados en relación con fuertes precipitaciones acontecidas durante el 2010 en el río Andarax. Sin embargo, los cambios más relevantes registrados se obtuvieron al estudiar las variaciones faunísticas entre largos periodos de tiempo, es decir, comparando datos actuales con los obtenidos durante la década de los 80. Tras la comparación de ambos periodos de muestreo se detectaron cambios en la riqueza de los invertebrados estudiados. Se observó un aumento de riqueza en altitud como consecuencia de la ampliación del rango de distribución de especies de tramos medios hacia cotas más elevadas y de colonización desde sierras próximas, que podemos interpretar como una respuesta de los macroinvertebrados a los cambios ambientales sufridos en los últimos 20 años.

➤ Objetivos y metodología

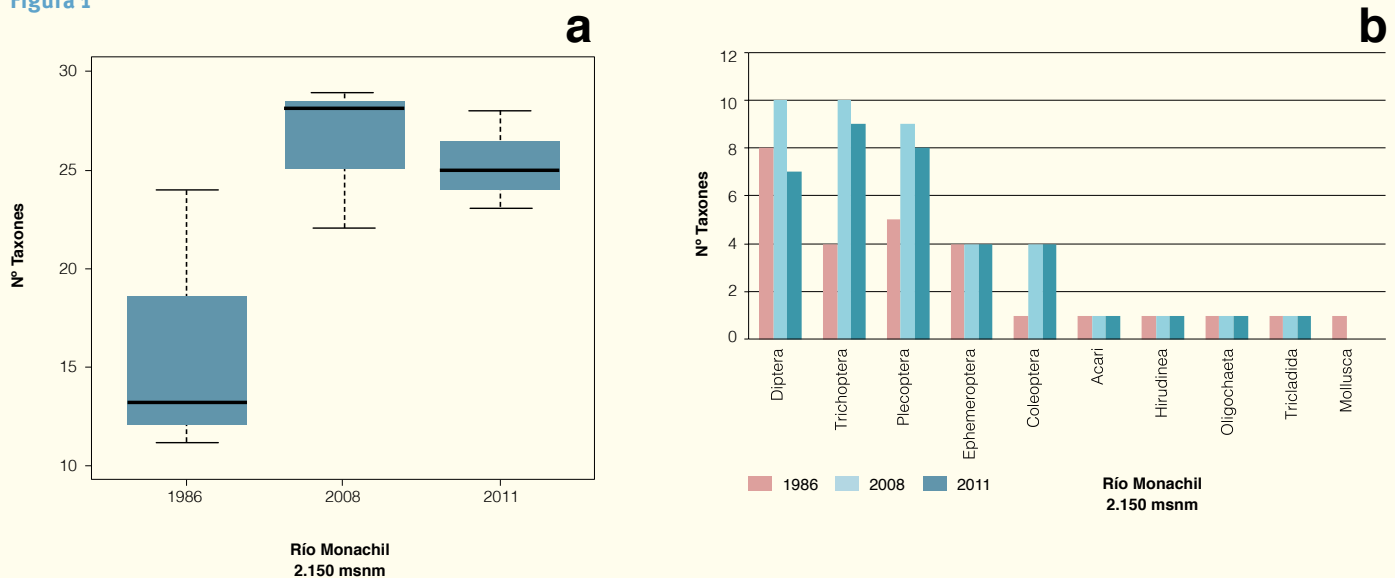
Se estudiaron cambios temporales a largo plazo en la riqueza de especies del Orden Trichoptera comparando datos actuales y los obtenidos en estudios realizados en la década de los 80 en el macizo de Sierra Nevada. Se muestrearon de forma estacional (primavera, verano y otoño) 19 localidades en 16 ríos y lagunas siguiendo

el protocolo de muestreo y laboratorio para la clasificación del estado ecológico de los ríos [4].

Por otro lado, para detectar cambios en la comunidad bentónica en los últimos 20 años, se seleccionaron los datos de 2 localidades (Monachil 2.150 msnm y Monachil 1.450 msnm)

de las 23 repartidas en 8 ríos que desde 2008, y con periodicidad estacional, se muestrean para el Programa de Seguimiento de los Efectos del Cambio Global en Sierra Nevada, los cuales se compararon con los publicados en la década de los 90 [5]. De igual manera, para la evaluación de cambios estructurales a nivel de comunidad

Figura 1



(a) Cambios en la riqueza taxonómica para la cota de alta montaña (2.150 msnm) del río Monachil (p-valor = 0,04)
y (b) cambios en la riqueza taxonómica en las familias en tres años de muestreo diferentes.

a corto plazo, se seleccionaron los datos de una de las localidades del río Andarax (1.050 msnm). En ambos casos, se siguió el protocolo de muestreo y laboratorio de fauna bentónica de invertebrados en ríos vadeables elaborado

por la Dirección General del Agua (MAGRAMA). Se capturaron además adultos de plecópteros y tricópteros para su determinación específica, pudiendo utilizarse estos datos para detectar posibles cambios en la distribución espacial

del orden Plecoptera, dada su sensibilidad a cambios ambientales.

➤ Resultados

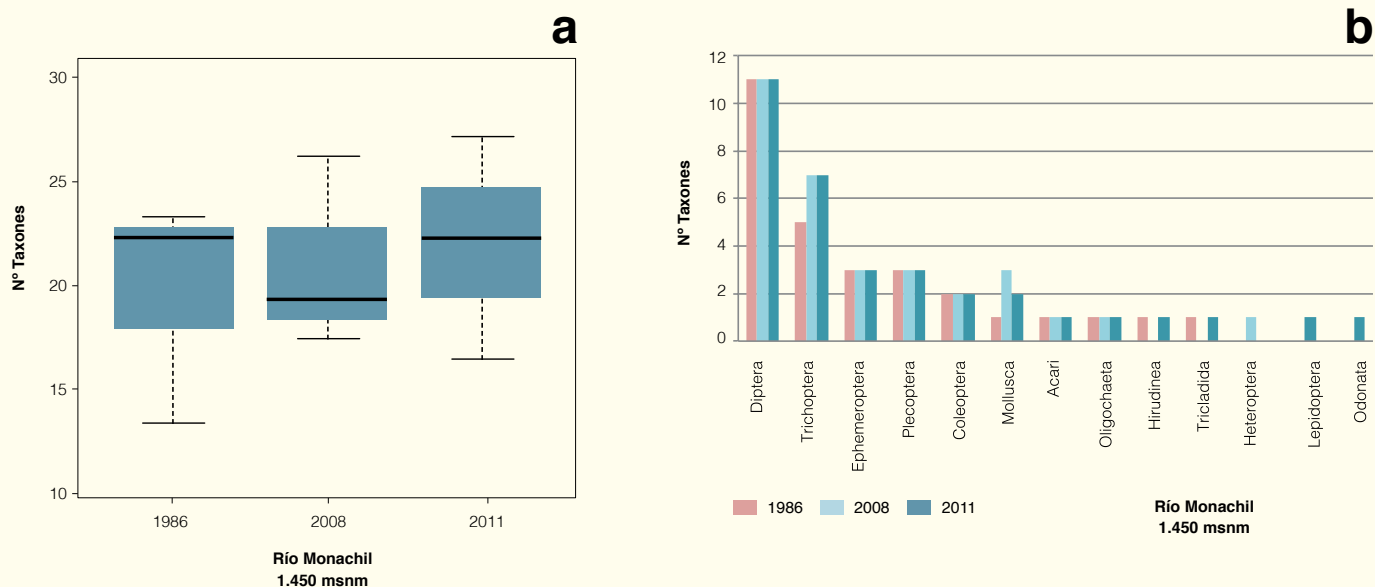
En el estudio comparativo realizado en el río Monachil, se detectó un aumento de la riqueza a nivel de familias de macroinvertebrados en cotas de alta montaña (2.150 msnm; Figuras 1a y b). Varios taxones considerados exclusivos de media montaña para el río Monachil en la década de los 80 [*Serratella ignita* (Ephemeroptera), *Perla marginata* (Plecoptera) o *Micrasema moestum* (Trichoptera)] fueron capturados por encima de los 2.000 msnm en los muestreos actuales. Lo mismo ocurrió con varias familias de los órdenes Diptera y Coleoptera, algunas de las cuales no habían sido capturadas con anterioridad en este río. Por el contrario, en la localidad de media-alta montaña (1.450 msnm) no se detectaron

cambios en relación a la riqueza taxonómica de la comunidad de macroinvertebrados (Figuras 2a y b). Resultados similares se encontraron al analizar la riqueza de especies de tricópteros en localidades situadas en todo el perímetro de Sierra Nevada. La riqueza de especies de este grupo ha aumentado en los últimos 20 años (Figura 3), sobre todo en las localidades situadas a altitud intermedia (1.800-2.000 msnm) dentro del rango estudiado (800-3.050 msnm). Así, la mayoría de las especies de tricópteros han aumentado su rango de distribución en altitud (*Rhyacophila meridionalis*, *Rhyacophila nevada*, *Hydroptila vectis*, *Philopotamus montanus*, *Hydropsyche infernalis*, *Micrasema*

moestum, *Halesus tessellatus*, *Athripsodes* sp., y *Sericostoma vittatum*) (Figura 4) o han sido capturadas por primera vez en el periodo de estudio más reciente (*Agapetus* sp., *Agapetus fuscipes*, *Hydropsyche pellucidula*, *Wormaldia occipitalis*, *Brachycentrus maculatum*, *Limnephilus obsoletus*, *Annitella iglesiasi*, *Mesophylax aspersus* y *Athripsodes albifrons*). Las especies que han aumentado su rango de distribución presentan, en general, buena capacidad dispersiva y habitan también en sierras próximas al macizo de Sierra Nevada.

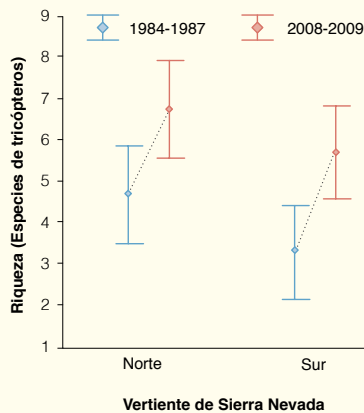
En el río Andarax se detectaron cambios en la composición de la comunidad en un corto periodo de tiempo (2008-2012).

Figura 2



(a) Cambios en la riqueza taxonómica para la cota de media montaña (1.450 msnm) del río Monachil (p-valor = 0,795) y (b) cambios en la riqueza taxonómica en las familias en tres años de muestreo diferentes.

Figura 3



Media ($\pm$ IC del 95%) de la riqueza de especies de tricópteros en los dos periodos de estudio, 1984-1987 y 2008-2009, tanto en la vertiente norte como sur de Sierra Nevada (rango: 800-3.050 msnm).

➤ Discusión y conclusiones

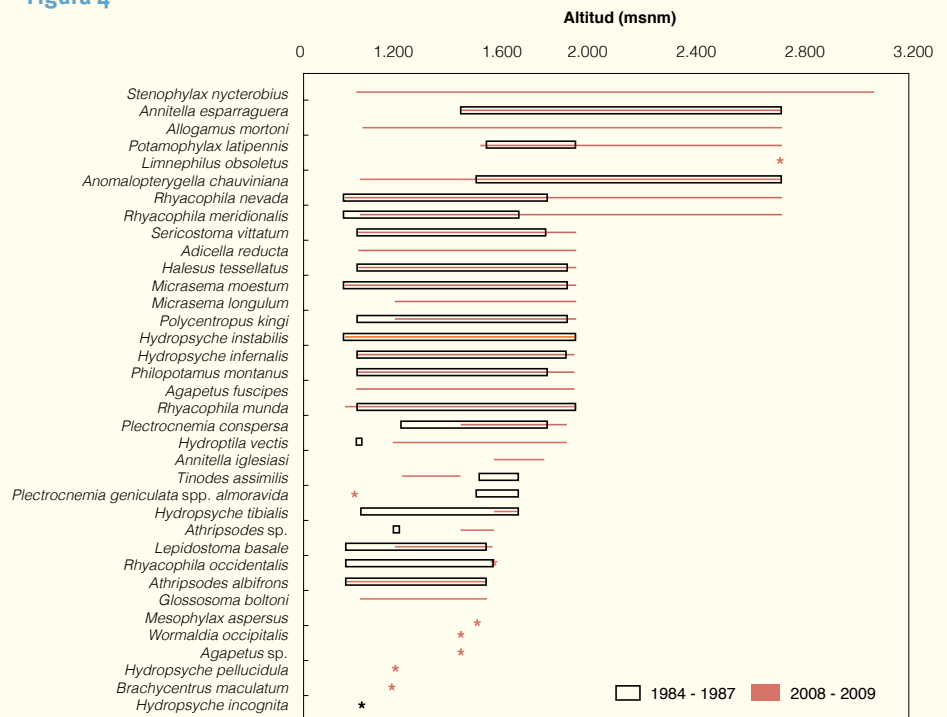
La relación detectada entre altitud y cambio en riqueza puede ser explicada mediante la hipótesis de que las montañas con un gradiente altitudinal considerable actúan como refugio de especies en un escenario de calentamiento climático [6]. Especies con suficiente capacidad dispersiva podrían alcanzar hábitats térmicamente adecuados [7] y las localidades de media-alta montaña podrían ser adecuadas no solo para especies con exigentes requerimientos ecológicos sino también para especies generalistas. Las especies endémicas resultarían más vulnerables, como consecuencia de su escasa capacidad dispersiva, así como por sus exigentes requerimientos por unas condiciones ecológicas concretas [8]. Estas especies se verán además amenazadas por otras más generalistas que sí sean capaces de migrar hacia altitudes más elevadas y competir por los mismos recursos.

Estos resultados pueden ser importantes a la hora de considerar posibles medidas de conservación de los ecosistemas fluviales frente al cambio climático. Un esfuerzo especial debe ir dirigido a proteger las condiciones de las lagunas, cabeceras y tramos altos de los ríos y arroyos, así como de las localidades a baja altitud donde la influencia humana puede ser más notable. Veinte años es un período corto de

en este periodo la riqueza taxonómica quedó mermada, reduciéndose de 63 familias capturadas durante 2008 y 2009 a 38 en 2010, afectando principalmente a los órdenes Coleoptera, Odonata, Heteroptera y Trichoptera, así como a los de la clase Gastropoda. Los primeros taxones en recolonizar la zona pertenecen al orden Diptera, llegando a representar más del 90% de los individuos capturados en la campaña de muestreo (primavera) posterior a las fuertes lluvias. Durante los muestreos de

2011, el número de taxones continuó siendo menor que en años anteriores (Figura 5). En el caso particular del orden Plecoptera, al comparar la distribución altitudinal de los muestreos actuales realizados para el seguimiento de la comunidad bentónica con los realizados en Sierra Nevada entre 1979 y 1986, se observa que varias especies se han hecho más raras o han desaparecido en su límite inferior de distribución (Figura 6), mientras que en las cotas superiores apenas se aprecian cambios.

Figura 4

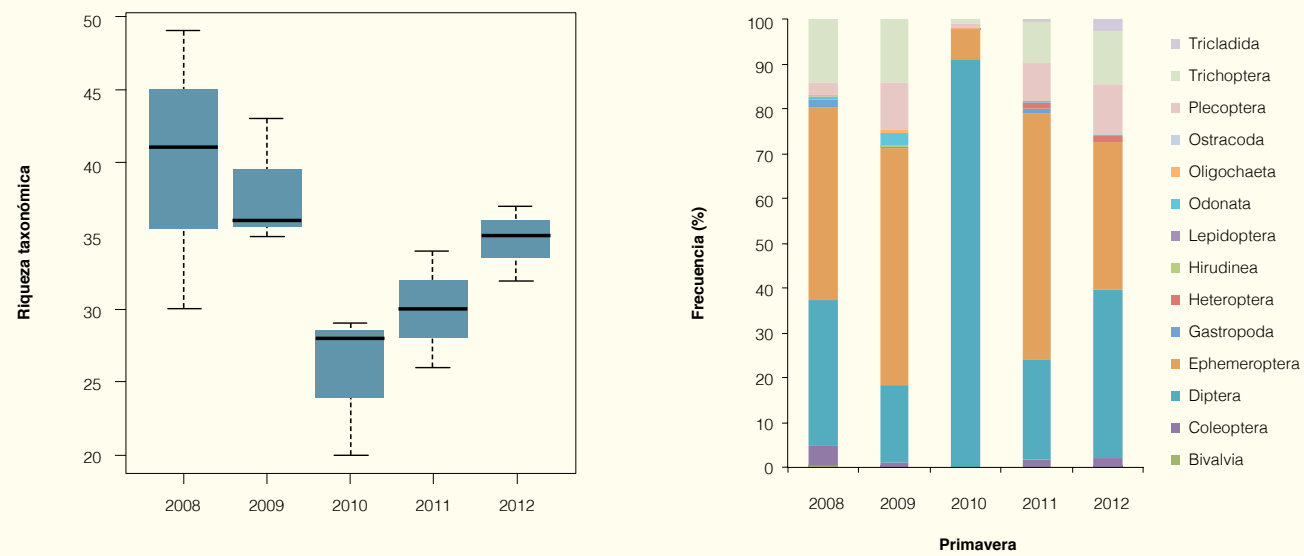


Distribución altitudinal de las especies de tricópteros en las localidades utilizadas para el estudio comparativo entre las dos épocas estudiadas (1984-1987 y 2008-2009).

tiempo para detectar los efectos del cambio climático sobre el conjunto de especies, por lo que podría ser pronto para evaluar el riesgo al que están sometidas especialmente las especies endémicas vinculadas a las cabeceras. Debido a que el descenso del caudal de agua de los ríos y el aumento de la temperatura es inevitable, sería necesario un mejor control de los sistemas acuáticos en la alta montaña para proteger a las especies que viven en las cabeceras e impedir la destrucción de sus hábitats.

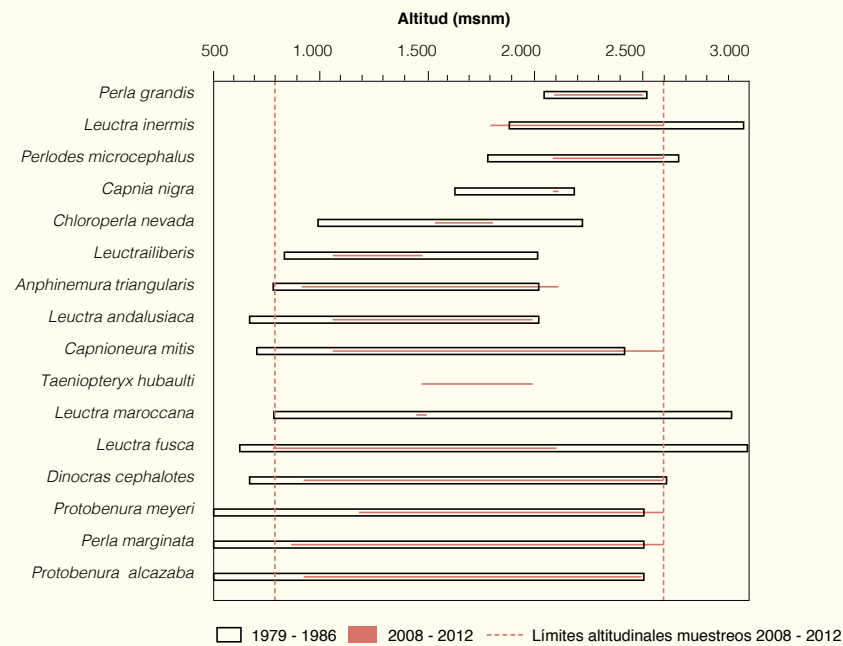
Las lluvias torrenciales afectan directamente a la composición y riqueza de la comunidad bentónica, necesitando de varios años para que algunos de los taxones vuelvan a ser capturados de nuevo en la zona afectada. El aumento en la torrencialidad de las precipitaciones como consecuencia del cambio climático será un factor adicional de riesgo para dichas comunidades.

Figura 5



Cambios en la riqueza taxonómica y abundancias relativas de la comunidad de invertebrados bentónicos tras lluvias torrenciales ocurridas a principios de 2010 en el río Andarax.

Figura 6



Diferencias en la distribución de plecópteros en Sierra Nevada entre 1979-1986 y 2008-2012.

4.3. Seguimiento de las poblaciones de trucha común

Galiana-García, M.; Rubio, S. y Galindo, F.J.

Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía

Resumen

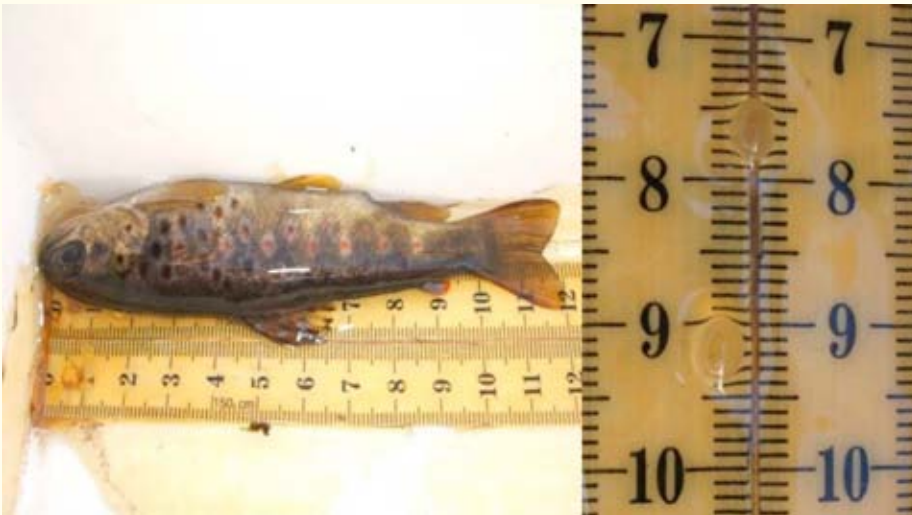
Durante nueve años se ha realizado un seguimiento de las poblaciones de trucha común en Sierra Nevada. En este período se han detectado indicios de ciclos de aumento y descenso de densidad y biomasa de las poblaciones muestreadas, asociados a variaciones en diversos factores ambientales, como la precipitación. Estas variaciones han sido detectadas a su vez en el resto de zonas donde habita la trucha común en Andalucía, en los Parques Naturales de Sierra de Castril, Sierras de Cazorla, Segura y Las Villas y en el de las Sierras de Tejeda, Almijara y Alhama. En varios ríos de los espacios naturales citados así como en Sierra Nevada se han detectado además patrones de variación de la densidad y biomasa muy parecidos, por lo que parece que las poblaciones se estén comportando de manera similar frente a las variaciones ambientales producidas por el cambio global.

> Objetivos y metodología

El objetivo es caracterizar las poblaciones de trucha común en Sierra Nevada y evaluar el efecto de factores bióticos y abióticos sobre la dinámica poblacional. Como medida de estimación poblacional se aplicó el método de Máxima Verosimilitud Ponderada, calculando la probabilidad de captura y el error estándar. La determinación de la edad se realizó mediante ecuaciones de crecimiento y lectura de escamas, con

objeto de verificar las estructuras poblacionales obtenidas a través de modelos matemáticos. Para la determinación de la biomasa se utilizó el peso medio de los ejemplares capturados. En la determinación de las precipitaciones, se utilizaron los datos de años hidrometeorológicos de la REDIAM y la función Watershed de ArcGIS 9.3 para establecer las cuencas de captación. El seguimiento de la fenología reproductiva se

llevó a cabo mediante masaje abdominal a los ejemplares capturados en diferentes épocas del año, anotando la formación de huevos o esperma para cada individuo sin realizar una extracción significativa del material reproductor. Para más detalles sobre la metodología seguida se debe consultar [9].



Hembra madura más pequeña capturada durante los muestreos, un ejemplar de 12 cm con huevos de 4 mm.

➤ Resultados

Los resultados de densidad y biomasa de trucha común obtenidos durante el periodo de estudio muestran que en la mayoría de las estaciones de censo hay una tendencia descendente hasta el año 2008 (Figura 1). A partir de 2009, por lo general los valores de densidad y biomasa se van incrementado, con la excepción de 2010, cuando las lluvias torrenciales acaecidas ese año modificaron sustancialmente los hábitats de trucha común, lo cual se vio reflejado en los valores de estos parámetros.

Los incrementos en los valores de densidad de los años 2011 y 2012 se deben principalmente al gran número de alevines muestreados en las estaciones de censo, y en muchas ocasiones, son los mayores reclutamientos detectados durante todo el periodo de muestreo.

Las variaciones de densidad se han comparado con los diferentes valores de precipitación anual (para los que se han utilizado datos de años hidrometeorológicos), detectando que existen

correlaciones entre las densidades de trucha común y los cambios que producen periodos de sequía y altas precipitaciones, los cuales modifican de manera significativa los efectivos poblacionales (Figura 2). Las precipitaciones torrenciales tienen efectos directos tanto sobre las poblaciones de truchas como de macroinvertebrados (ver ficha 4.2.), detectándose grandes disminuciones en las densidades registradas.

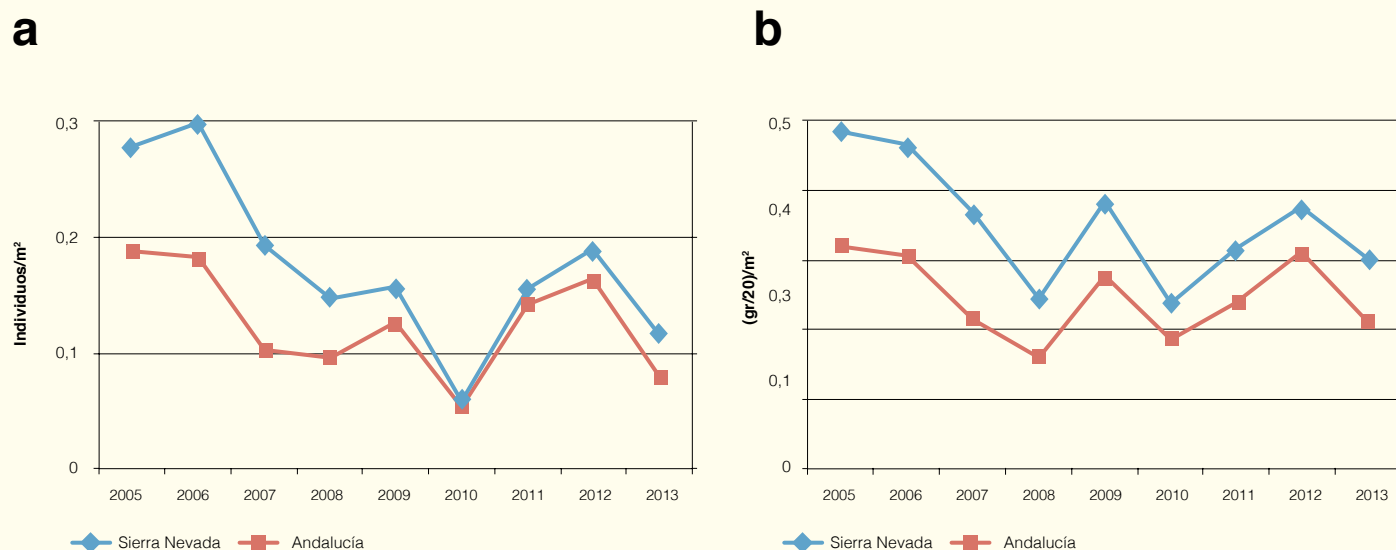
Tras estos periodos de lluvias torrenciales (acaecidos en 2010), al igual que ocurre con las comunidades de macroinvertebrados acuáticos (ver ficha 4.2.), la recuperación de las poblaciones de trucha común se ha producido en el año siguiente a dichos periodos de fuertes precipitaciones. Por otra parte, las menores precipitaciones, como las de 2012, afectaron significativamente al número de alevines, tal como se detectó en los muestreos de 2013.

Respecto a las clases de edad capturadas durante los muestreos, la tendencia general es

que las poblaciones presenten un bajo número de ejemplares adultos, siendo inexistentes las capturas de éstos en gran cantidad de muestreos (Figura 3).

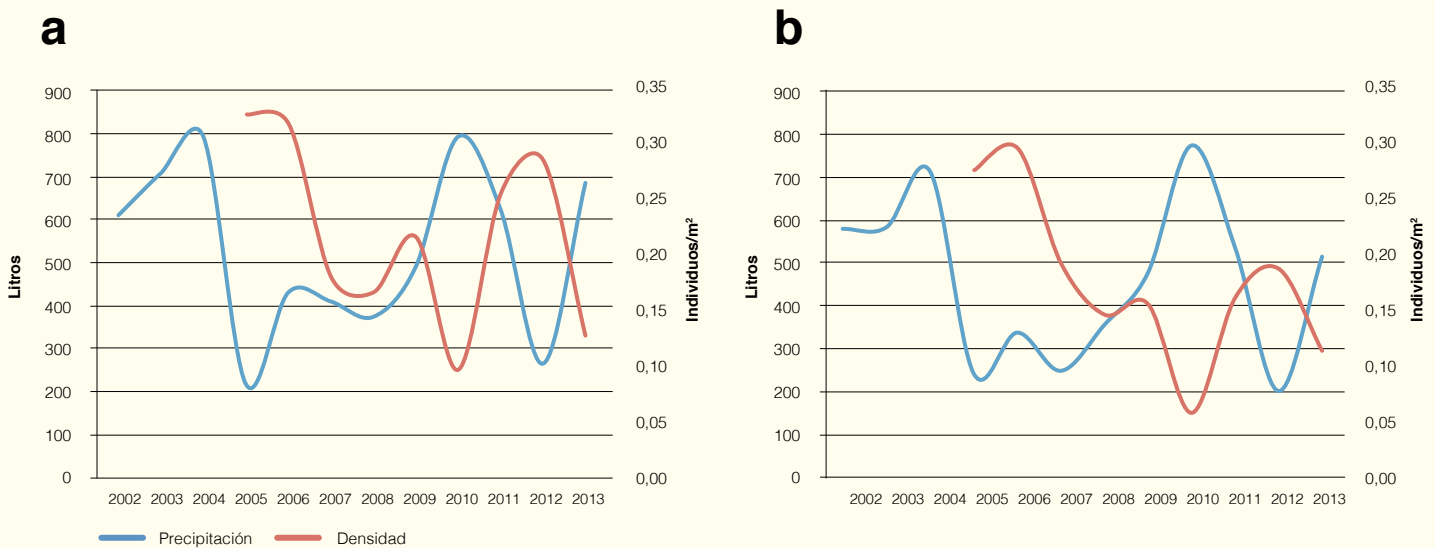
Generalmente, la trucha común se reproduce en otoño o invierno; tanto más pronto en el año cuanto mayor sea la latitud y altitud debido a las bajas temperaturas del agua y los periodos de incubación más largos [10, 11]. En su área de distribución natural la fecha media de freza tiene lugar entre principios de octubre, en Finlandia o Noruega [12], y febrero en poblaciones meridionales como Asturias [13] y Granada [11]. En el río Castril (Granada) se observó un período de reproducción muy extenso (5 meses), registrándose la construcción del último nido a principios de abril [11] (Figura 3). En los trabajos realizados en Sierra Nevada, se han detectado ejemplares reproductores, algunos incluso de pequeño tamaño, desde el mes de octubre hasta la primera quincena de mayo.

Figura 1



Densidades (a) y biomasa (b) de trucha común en Sierra Nevada (línea azul) y en Andalucía (línea roja) (Censo Andaluz de Pesca).

Figura 2



Evolución temporal de la densidad de trucha y la precipitación en Sierra Nevada (a) y Andalucía (b) (años hidrometeorológicos).

> Discusión y conclusiones

Las mayores densidades y biomasa de trucha común en Andalucía se han localizado en Sierra Nevada, en las cuencas de Guadalfeo y Genil. De todas las poblaciones muestreadas, solo las poblaciones de los ríos Chico de Soportújar y Lanjarón se pueden considerar abundantes en términos de biomasa, lo que evidencia el delicado estado de este salmónido en Andalucía.

Además, son varios los ríos que se encuentran sometidos a fenómenos de desecación de sus cauces por extracciones de centrales hidroeléctricas (Dílar y Monachil) y acequias (Bérchules, Chico de Soportújar, Torrente, Trevélez, Andarax y Mecina), lo cual supone un grave factor de amenaza para las poblaciones de trucha común que los habitan.

La relación detectada entre el régimen pluviométrico anual y las variaciones en densidad de las

poblaciones de trucha común parece indicar que esta especie es muy sensible a las variaciones ambientales, tal como demuestran la influencia de las sequías y lluvias torrenciales en el número de ejemplares detectados en los muestreos. La recuperación de las poblaciones tras los fenómenos de lluvias torrenciales (que producen descensos bruscos en las comunidades muestreadas) se produce de manera casi inmediata. Esto probablemente sea debido a la adaptación de las poblaciones de trucha común a estos fenómenos relativamente frecuentes en Sierra Nevada.

Sin embargo, pese a detectarse en las campañas de 2011 y 2012 gran número de alevines y juveniles, en buena parte de las estaciones de muestreo el número de ejemplares adultos ha sido bajo durante todo el periodo de censo, siendo la estructura de edades fuertemente

desequilibrada, con alta predominancia de las clases 0+ y 1+. La escasa disponibilidad de refugio de adultos durante determinadas épocas del año parece constituir la parte más importante de este factor limitante, sin embargo otros factores como las desecaciones debidas a acciones del hombre y depredación condicionan la escasa presencia de adultos.

Tal como se ha descrito, el periodo reproductivo de las truchas en Sierra Nevada es más extenso que todos los descritos en la literatura científica (Figura 4). Como sugieren otros autores [11], este extenso periodo reproductivo constituye una ventaja en un régimen hidrológico altamente impredecible, como el de Sierra Nevada.

Figura 3

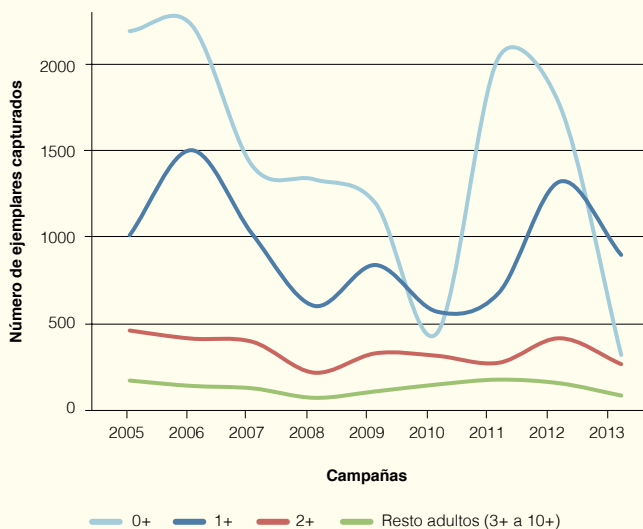
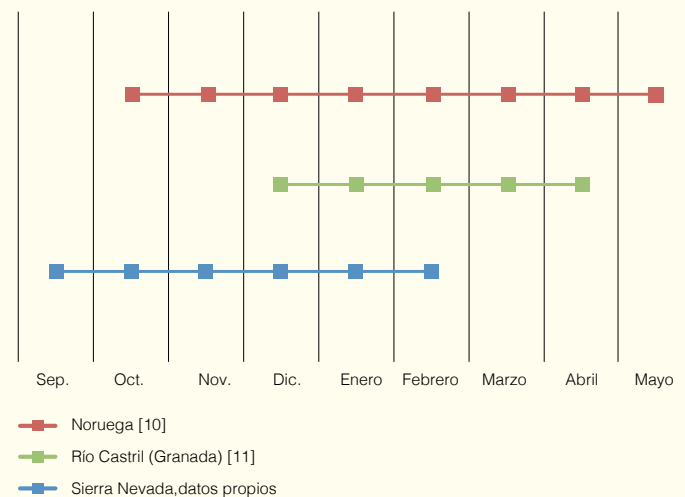


Gráfico del número de capturas (expresadas por clases de edad) de trucha común desde el año 2005. A lo largo del periodo de muestro los alevines capturados suponen una media del 50,3% de las capturas realizadas. Alrededor de un 32,8% de las capturas corresponde a ejemplares juveniles, siendo el restante 16,9% el porcentaje de ejemplares adultos. De los ejemplares adultos, en torno al 71,7% se encuentra en la clase de edad 2+, por lo que son escasas las capturas de ejemplares de edad 3+ o superior (tan solo un 4,8% de las capturas totales).

Figura 4



Periodos de freza de trucha común.



Ejemplar de trucha común.

4.4. Centinelas del cambio global (I): las algas mixotróficas en la Laguna de La Caldera

Medina-Sánchez, J.M.; Delgado-Molina, J.A. y Carrillo, P.
Universidad de Granada.

Resumen

Los productores primarios de las lagunas de alta montaña de Sierra Nevada (como La Caldera) están dominados por microalgas con metabolismo mixotrófico, que les confiere ventaja adaptativa en un ambiente sometido a estrés por radiación ultravioleta y extrema oligotrofia. Esta dominancia condiciona toda la estructura y modo de funcionamiento de sus comunidades planctónicas. Sin embargo, recientemente se ha observado un incremento en la presencia y persistencia estacional de microalgas con metabolismo autotrófico estricto. Los resultados de un diseño experimental *in situ* de simulación de entradas crecientes de nutrientes alóctonos asociados a aerosoles de origen sahariano indican que incrementos en la concentración de fósforo producen dramáticos cambios en la comunidad algal. Estos cambios implican la pérdida del compartimento mixotrófico, que es desplazado por un desarrollo explosivo de una comunidad algal con muy baja diversidad, dominada por especies autotróficas estrictas resistentes a la radiación ultravioleta, y que llega a perjudicar a la red microbiana heterotrófica y a los consumidores herbívoros. Estos procesos de eutrofización podrían estar afectando con intensidad creciente a estas lagunas, que funcionan, por tanto, como excelentes sensores de cambio global.

► Objetivos y metodología

Los experimentos se realizaron *in situ* sobre 10 mesocosmos (1 m de diámetro, 7 m de profundidad y 2.700 l de capacidad), conteniendo agua tomada de la capa de mezcla del lago. El material de los mesocosmos fue polietileno, que transmite todo el espectro de radiación solar (transmitancia: ~60% a 280 nm y >80% a 700 nm de longitud de onda). El diseño experimental factorial completo (5x2) consistió en: (i) cinco niveles de enriquecimiento con fósforo

(P) en concentración final creciente (no adición [control], 20, 30, 40 y 60 $\mu\text{g P L}^{-1}$) y con NH_4NO_3 hasta una razón molar N:P de 30 para evitar la limitación de los organismos por nitrógeno; (ii) dos niveles de calidad de radiación solar (presencia y ausencia de radiación ultravioleta) cubriendo la mitad de los mesocosmos con una lámina de plexiglás que excluía la radiación ultravioleta incidente (tratamientos con ausencia de UVR). Tras el pulso de nutrientes, los meso-

cosmos se incubaron *in situ* durante 70 días. La periodicidad de muestreo de los mesocosmos se ajustó a los tiempos de generación de los diferentes organismos estudiados (bacterias, fitoplancton, zooplancton). La metodología analítica seguida para cuantificar las distintas variables respuesta (físico-químicas y biológicas) se detalla en la referencia [14].

► Resultados

La estructura y funcionamiento de la red trófica pelágica de la laguna de La Caldera está regida por la dominancia (entre los productores primarios) de una comunidad de microalgas flageladas unicelulares capaces de combinar la capacidad fototrófica (hacer fotosíntesis) con la heterotrófica (ej. ingestión de bacterias por fagotrofia). Esta modalidad mixta de nutrición, denominada mixotrofia, resulta ventajosa en estas condiciones de extrema oligotrofia y

de estrés por radiación ultravioleta (UVR) al establecerse una regulación compleja entre los mixótrofos y las bacterias, denominada de una forma un tanto poética como “*Ni contigo, ni sin ti*” [15]. Así, las bacterias son sometidas a un importante control por depredación por parte de las algas (“*Contigo yo muero...*”) que capturan los nutrientes minerales “caros” empaquetados como bacterias, a la vez que las bacterias dependen del carbono orgánico “barato” fijado

y excretado por las algas (“*...Sin ti no puedo vivir*”).

Como resultado, la capacidad depredadora (fagotrófica) de los mixótrofos actúa como un “*by-pass*” favoreciendo el flujo de energía y nutrientes hacia la cadena de los consumidores herbívoros. Los mixótrofos ocupan el nicho ecológico de los microorganismos heterotróficos, con lo que se produce un escaso desarrollo

de la red microbiana heterotrófica (bacterias, flagelados y ciliados heterotróficos), una característica singular de las lagunas de alta montaña de Sierra Nevada (Figura 1a).

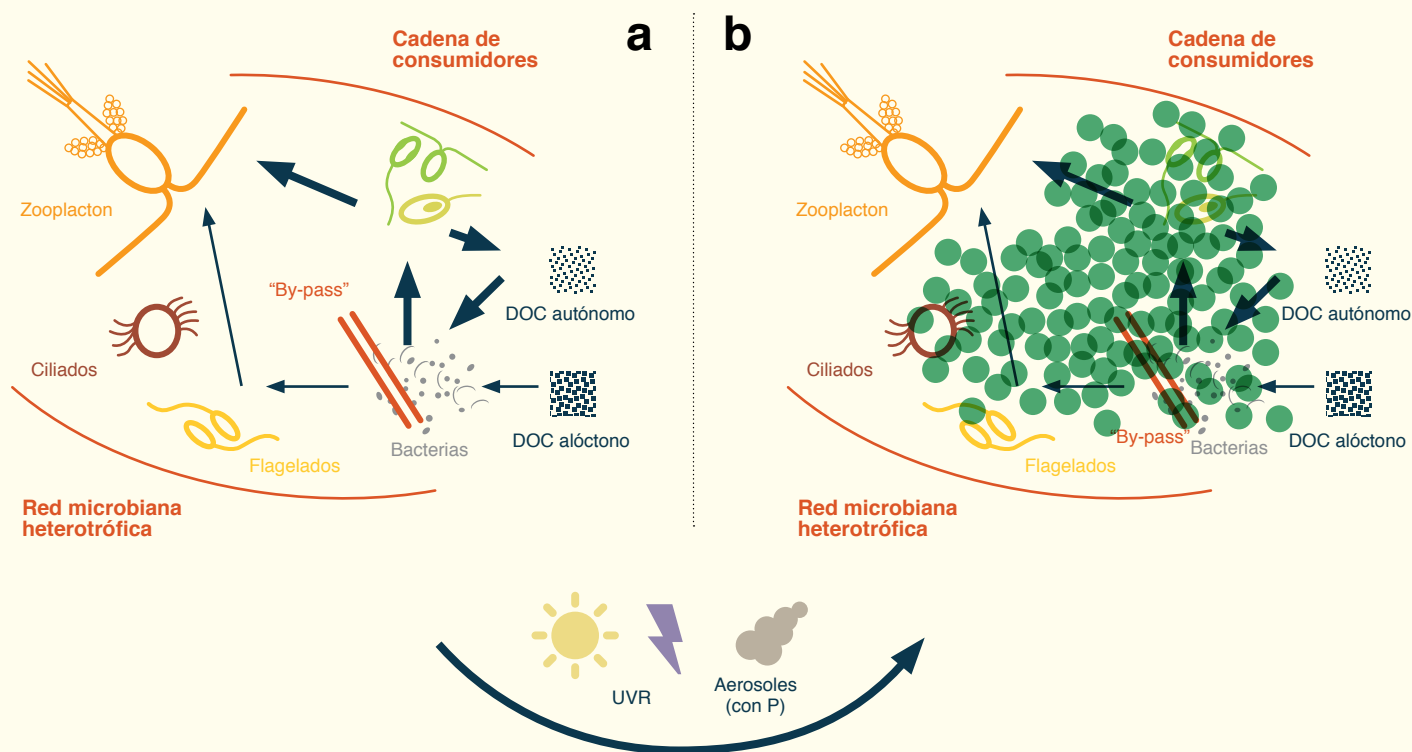
En una serie temporal comprendida entre 1975 hasta 2010 se ha observado un incremento en la abundancia y persistencia estacional de algas con metabolismo autotrófico estricto (sólo fotosintéticas). Ante la cuestión de si esta

tendencia puede ser debida al mayor transporte atmosférico de aerosoles ricos en nutrientes observado recientemente [16], los resultados de un diseño experimental complejo (mesocosmos incubados *in situ* en la laguna de La Caldera, simulando escenarios de entradas actuales y futuras de nutrientes alóctonos asociados a aerosoles saharianos, [17]), subrayan el papel clave de las entradas de fósforo capaces de generar importantes cambios en la comunidad

algal. Los pulsos de fósforo provocaron un desarrollo explosivo de una sola especie (autótrofa estricta) de crecimiento rápido y tolerante a UVR (*Dictyosphaerium chlorelloides*), que desplazó a una comunidad algal más diversa de mixótrofos y diatomeas (Figura 1b), resultando en un acusado descenso en la diversidad algal (Figura 2) [18] y en el colapso total de la red microbiana heterotrófica (Figura 1b).

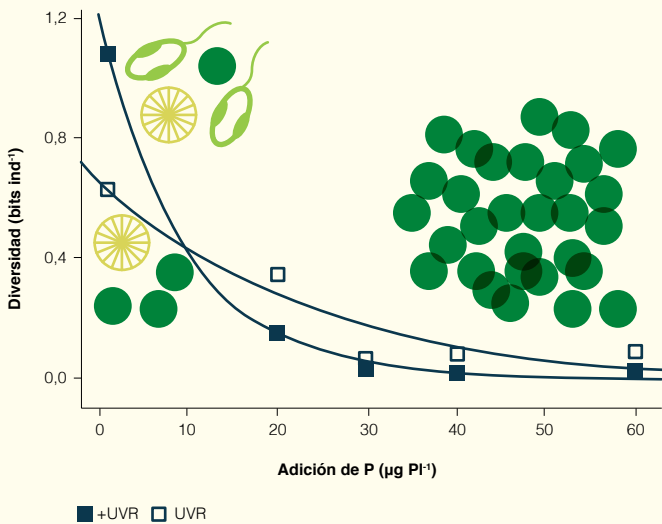
Figura 1

Lago oligotrófico de alta montaña



(a) Diagrama de la estructura planctónica y el flujo de carbono (flechas negras, con grosor proporcional al flujo) entre sus componentes presentes en lagos de alta montaña. Modificado de [15]. (b) Cambios en la estructura de la red trófica tras la entrada pulsada de nutrientes minerales asociados a los aerosoles atmosféricos. Modificado de [14]. DOC: Carbono orgánico disuelto. UVR: Radiación ultravioleta. P: Fósforo.

Figura 2



Variación en el índice de diversidad (*Shannon-Wiener*) de la comunidad algal en los tratamientos experimentales. Los marcadores representan valores medios de diversidad; las curvas representan las líneas de regresión no lineal (modelo exponencial). Modificado de [18].

Figura 3



Laguna de la Caldera en pleno proceso de deshielo.

➤ Discusión y conclusiones

Los resultados experimentales evidencian que incrementos en las entradas pulsadas de nutrientes provocan el desarrollo de una comunidad algal simplificada, con muy baja diversidad, debido al predominio de una o pocas especies de autótrofos estrictos resistentes a UVR, y que pueden alcanzar densidades de hasta tres órdenes de magnitud superiores a las habituales del

sistema. Estos resultados sugieren un vínculo entre la mayor presencia y persistencia estacional de algas autotróficas estrictas observada en años recientes y la tendencia al incremento en el transporte atmosférico de aerosoles saharianos. La acentuación de esta tendencia con el cambio global puede implicar no sólo la pérdida de biodiversidad taxonómica y funcional, sino

la pérdida de todo un grupo funcional característico de estas lagunas (algas mixotróficas), el colapso de la red microbiana heterotrófica, e incluso un impacto negativo en el desarrollo de los eslabones tróficos superiores, como el zooplancton herbívoro (ver ficha 4.5.).

4.5. Centinelas del cambio global (II): los consumidores herbívoros en la Laguna de La Caldera

Villar-Argaiz, M.¹ y Bullejos, F.J.²

¹Universidad de Granada ²University of Oslo

Resumen

Los sistemas lénticos de alta montaña, por su carácter remoto y ultraoligotrófico, son sensores óptimos del impacto del cambio global. Los registros físico-químicos y biológicos a largo plazo de la Laguna de La Caldera se remontan a más de tres décadas de estudios ininterrumpidos desde sus inicios en 1975 y que han convertido a este tipo de ecosistemas en “centinelas” de cambio global en Sierra Nevada. Estos registros se complementan con extensas bases de datos por satélite que, como las de aerosoles (TOMS-NASA), permiten cuantificar con éxito la frecuencia e intensidad de los eventos atmosféricos.

A lo largo de las últimas décadas se ha incrementado la intensidad y frecuencia de las intrusiones de aerosoles fundamentalmente de procedencia sahariana que afectan Sierra Nevada. El efecto fertilizador del polvo atmosférico se ha reflejado en un aumento lineal de fitoplancton, pero no de sus consumidores herbívoros del zooplancton que decrecieron a cantidades elevadas de alimento. Para testar los efectos de la entrada alóctona de nutrientes se utilizaron grandes mesocosmos (3.000 l) en la laguna de La Caldera durante 70 días, a los que se añadieron nutrientes a cantidades crecientes simulando intrusiones atmosféricas. De forma consistente con las series temporales, los resultados experimentales demuestran que entradas moderadas de nutrientes favorecieron el crecimiento de algas y consumidores, pero que su “exceso” ($>20\text{--}30\text{ }\mu\text{g de fósforo l}^{-1}$), podría afectar al crecimiento de los consumidores herbívoros y, por su efecto fertilizador, reducir la transparencia y calidad del agua.

➤ Objetivos y metodología

El objetivo es caracterizar las tendencias de deposición de aerosoles en la laguna de la Caldera, así como su impacto en las poblaciones de consumidores herbívoros en dicha laguna.

Teledetección por satélite

Se utilizó el índice de aerosoles (AI) desarrollado por la NASA como un proxy de la deposición de fósforo inorgánico. El índice AI se obtiene a partir de medidas de irradiancia TOMS (*Total Ozone Mapping Spectrometer*) de los satélites *Nimbus 7* (1978-1993) y *Earth Probe* (1996-2004) de la NASA obtenidas para las coordenadas más próximas a la Laguna de la Caldera ($37,5^{\circ}\text{N}$; $3,075^{\circ}\text{W}$).

Seguimiento biológico interanual de la Laguna de la Caldera

Los muestreos de fitoplancton y zooplancton se iniciaron en 1973 y 1975, respectivamente. Aunque la series temporales no son completas, la laguna fue muestreada un mínimo de cuatro y un máximo de quince veces anualmente. La estimación de la abundancia y biomasa del fitoplancton y zooplancton se llevó a cabo de acuerdo con protocolos estandarizados y publicados previamente [19, 20].

Experimentación in situ

El experimento consistió en la colocación de bolsas de polietileno (0,7 m diámetro x 7 m longitud) que fueron suspendidas

en una plataforma anclada en la zona de máxima profundidad del lago (Figuras 1c y d). Los encerramientos recibieron cantidades crecientes de fósforo (NaH_2PO_4) dando lugar a los tratamientos de adición (20, 30, 40 y $60\text{ }\mu\text{g P l}^{-1}$), excepto el encerramiento control sin adición de P ($0\text{ }\mu\text{g P l}^{-1}$) que permitió reproducir las condiciones del lago. La concentración de nutrientes añadida en el tratamiento más enriquecido de $60\text{ }\mu\text{g P l}^{-1}$ fue similar a los máximos registros de aerosoles detectados en Sierra Nevada [21]. A lo largo de 70 días de incubación se tomaron muestras periódicas para determinar la biomasa de fitoplancton y zooplancton tal y como se ha descrito anteriormente para el seguimiento biológico de la laguna.

➤ Resultados

Seguimiento interanual

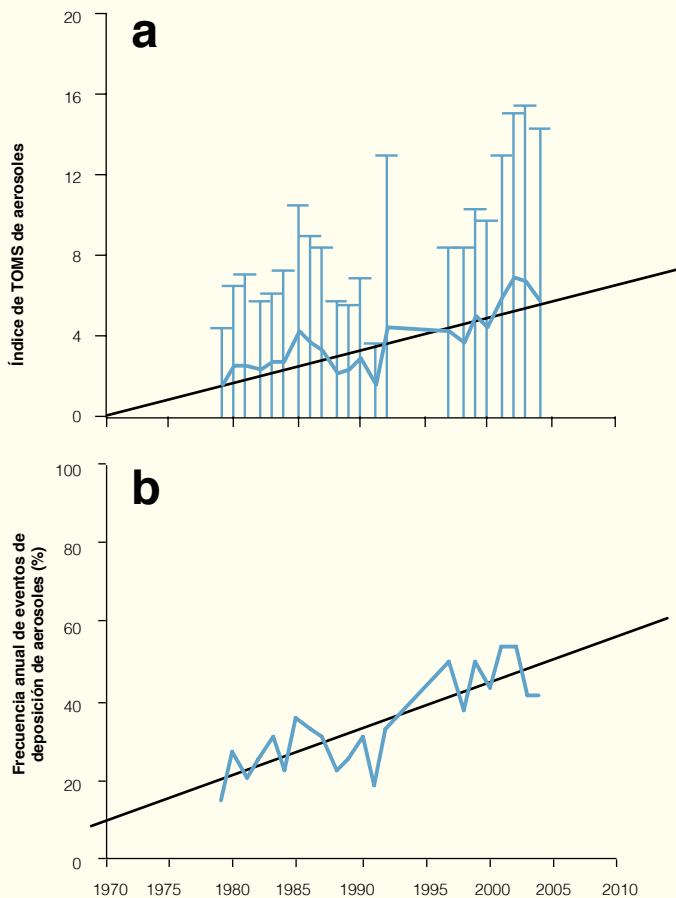
El análisis de las series de datos atmosféricos de la NASA indica que a lo largo de las últimas décadas (1978-2004) se ha registrado un incremento en el contenido de aerosoles de la troposfera en el área de Sierra Nevada, y especialmente a partir de 1990. Durante este periodo la magnitud de aerosoles (TOMS A1) se ha multiplicado por cinco (Figura 1a), mientras que la frecuencia de estos eventos atmosféricos se ha multiplicado por tres (Figura 1b). Desde el punto

de vista biológico, la relación positiva entre la intensidad y frecuencia de intrusiones de aerosoles y la biomasa de fitoplancton en la Laguna de La Caldera (Figuras 2a y b), indican que los aerosoles aportan nutrientes que pueden llegar a fertilizar estos sistemas ultraoligotróficos. El análisis comparativo de las dinámicas poblacionales a lo largo de las últimas tres décadas indica un cambio temporal en la relación fitoplancton-zooplancton. Mientras que la biomasa del zooplancton se mantuvo por encima de la del fitoplancton hasta mediados de la

década de los 90, el fitoplancton se hizo dominante a partir de esta fecha, coincidiendo con el incremento de aerosoles y, dando lugar a un importante desacople en la relación productor primario-consumidor herbívoro. Como consecuencia la relación interanual entre la biomasa de fitoplancton y del zooplancton no fue lineal sino unimodal con un máximo de zooplancton alrededor de 100-150 µg de peso fresco de fitoplancton por litro ($y = -0,009 x^2 + 2,285 x$, $p < 0,05$; Figura 3b).

Figura 1

Seguimiento Interanual



Dinámica interanual del (a) índice de aerosoles y (b) frecuencia anual de eventos de deposición de aerosoles (TOMS-NASA). (c) Aspecto de los mesocosmos experimentales en la Laguna de La Caldera en 2003 y (d) del transporte de materiales para su realización.

Estudio Experimental



Estudio experimental: mesocosmos

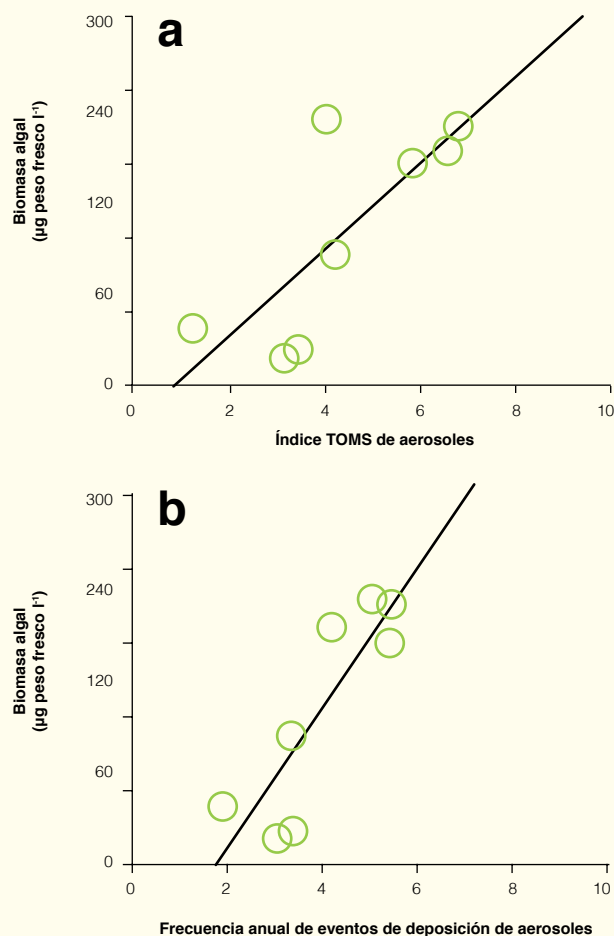
El efecto que nutrientes adsorbidos a aerosoles pudiera ejercer sobre las comunidades biológicas naturales fue testado experimentalmente en la Laguna de La Caldera en el año 2003. El

enriquecimiento experimental con nutrientes incrementó la biomasa algal de forma lineal (Figura 2c). Por el contrario, la respuesta de los consumidores herbívoros frente al enriquecimiento no fue lineal sino unimodal (Figura 3c). Como consecuencia la biomasa del zooplancton

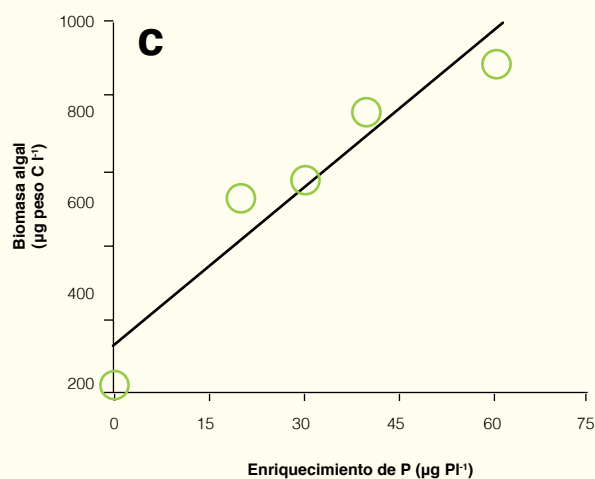
incrementó de forma paralela al fitoplancton hasta un umbral intermedio de enriquecimiento (tratamientos 20 y 30; Figura 3d) a partir del cual el zooplancton decreció coincidiendo con una mayor abundancia de fitoplancton.

Figura 2

Seguimiento Interanual



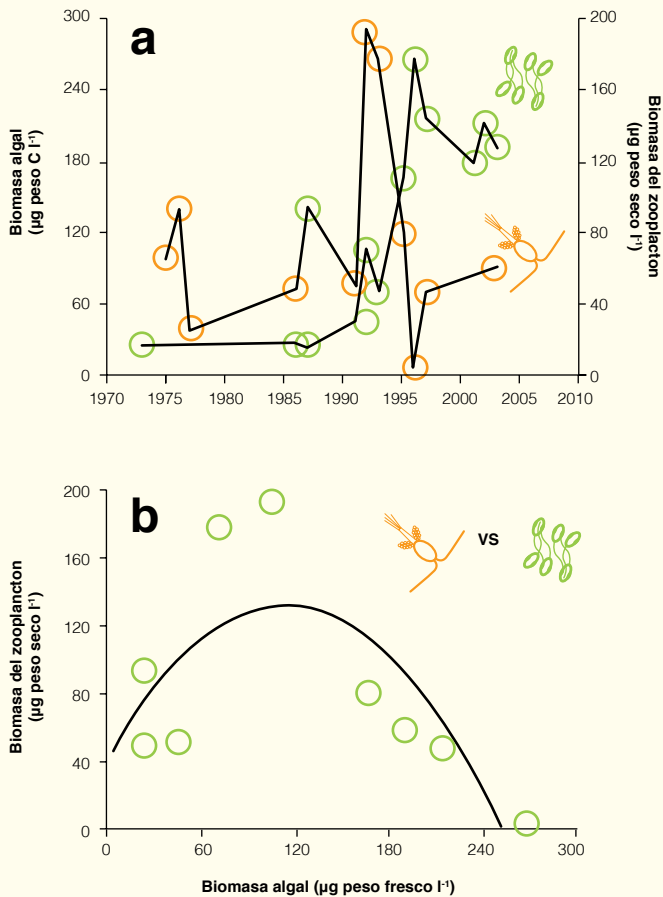
Seguimiento Experimental



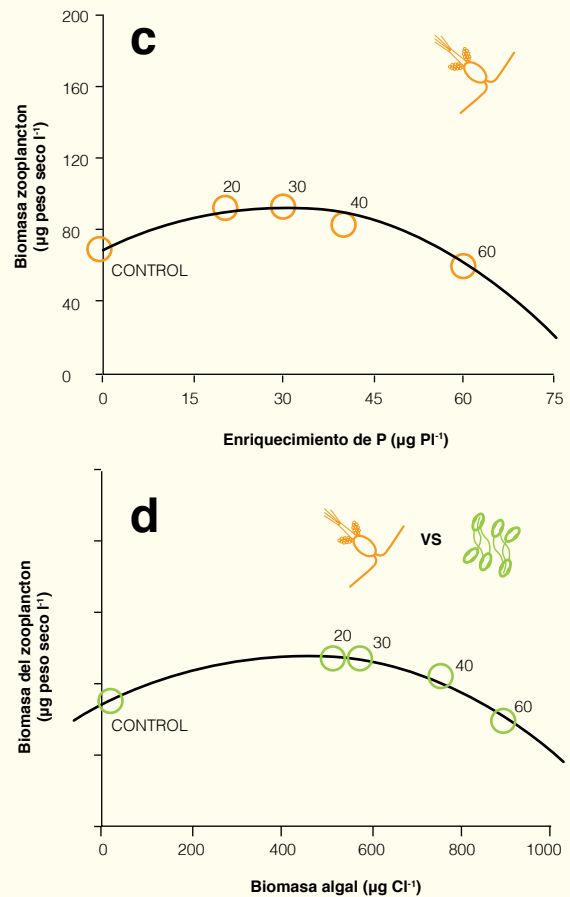
- (a) Relaciones entre la biomasa de algas y el índice TOMS de aerosoles y (b) la frecuencia anual de eventos de deposición.
(c) Relación entre la biomasa de algas y el enriquecimiento en fósforo en los mesocosmos experimentales de 2003.

Figura 3

Seguimiento Interanual



Seguimiento Experimental



(a) Dinámicas temporales de las poblaciones de algas y zooplancton en la Laguna de La Caldera (serie histórica desde el 1973 al 2004). (b) Relación entre la biomasa de las algas y del zooplancton en la Laguna de la Caldera. Relaciones entre la biomasa del zooplancton y (c) el enriquecimiento en fósforo y (d) la biomasa de algas en los experimentos de 2003.

➤ Discusión y conclusiones

El seguimiento a largo plazo de las dinámicas poblacionales del plancton pelágico de la Laguna de la Caldera indica que el fitoplancton autotrófico ha aumentado de forma paralela al incremento en la intensidad y frecuencia de los aerosoles atmosféricos. Estos resultados sugieren que los

nutrientes alóctonos asociados a intrusiones saharianas poseen un efecto fertilizador que estimula el crecimiento de la biomasa algal. Estos patrones son coincidentes con trabajos anteriores que indican que las deposiciones saharianas constituyen importantes fuentes de nutrientes y

en especial de P [21] que favorecen el incremento de clorofila en las aguas oligotróficas de lagos de alta montaña de Sierra Nevada [19], los Alpes [22] o el Mar Mediterráneo [23].

Tradicionalmente, la deposición de nitrógeno atmosférico, tanto en forma seca como en lluvia ácida, ha recibido especial atención debido al incremento en el uso de combustibles fósiles y la intensificación de la agricultura. Sin embargo la posición geográfica de Sierra Nevada en el entorno de influencia y retrotrayectoria de los vientos procedentes del Sahara, hace que los sistemas acuáticos de la alta montaña reciban más P del que cabría esperar en otro tipo de lagos alpinos del centro y norte de Europa. Aunque se trata de sistemas mayoritariamente limitados por P, recientemente se ha propuesto que la entrada de P asociada a las intrusiones saharianas puede incluso llegar a provocar el cambio en la limitación mineral de fósforo a nitrógeno en estos sistemas.

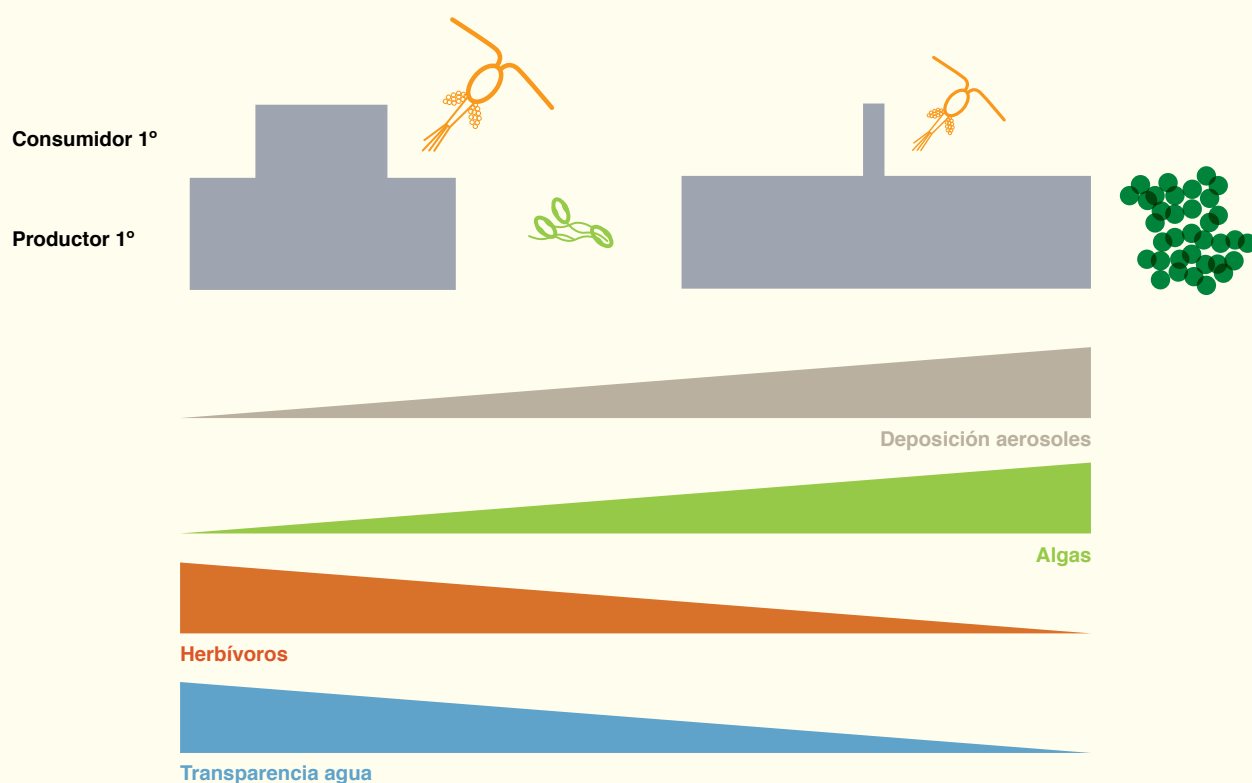
Pero, la vida en un mundo más polvoriento, ¿qué efectos puede causar sobre el resto de la cadena trófica? Para resolver a esta pregunta es imprescindible trazar los efectos que la entrada de nutrientes adsorbidos al polvo atmosférico ejerce sobre los consumidores de productores primarios.

Tanto las observaciones naturales como los experimentos llevados a cabo en la laguna de la Caldera indican que las intrusiones saharianas no refuerzan el control de abajo-arriba (*bottom-up*) del sistema, es decir que el crecimiento de las algas no favorece el desarrollo de los herbívoros. Por el contrario y si, como se demuestra experimentalmente, el consumidor herbívoro dominante en estos sistemas (el copépodo *Mixodiatomus laciniatus*) no puede controlar la

proliferación de las algas, éstas podrían acumularse en el sistema provocando una fertilización indeseada que empeoraría el estado trófico final de los sistemas (Figura 4).

En resumen, los procesos atmosféricos que afectan al territorio poseen importantes repercusiones que pueden afectar al estado trófico de los ecosistemas a través de la alteración del ciclo de los nutrientes y reduciendo la eficiencia con la que energía y materiales se transfieren a lo largo de la cadena trófica. Estos estudios ponen de manifiesto la importancia de continuar con los programas de seguimiento a largo plazo (LTER-España) en los sistemas lénticos de alta montaña, que por su carácter remoto y ultraoligotrófico, son sensores óptimos del impacto del cambio global.

Figura 4



Esquema representativo de los efectos del incremento en las intrusiones saharianas sobre la red trófica de un sistema acuático pelágico, favoreciendo la proliferación de algas, disminuyendo la biomasa de herbívoros y la transparencia del agua.



Las lagunas de origen glaciar representan ecosistemas muy sensibles y que responden con rapidez a los cambios en el medio que los rodea. Laguna de Juntillas (2.930 msnm).

Bibliografía

› Más referencias en http://refbase.iecolab.es/ref_dossier_resultados.html”

4.1. Seguimiento de factores físico-químicos y caudales en los ríos de Sierra Nevada

- [1] Sherri, L.J. (2004). Factors influencing stream temperatures in small streams: substrate effects and a shading experiment. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 61: 913-923.
- [2] Hairston, N.G. & Fussmann, G.F. (2002). *Lake Ecosystems. Encyclopedia of Life Sciences*. Wiley-Interscience, New York.
- [3] Webb, B.W.; Clack P.D. & Walling D.E. (2003). Water-air temperature relationships in a Devon river system and the role of flow. *Hydrological Processes*, 17: 3069-3084.

4.2. Cambios en la riqueza, abundancia y composición de las comunidades de invertebrados bentónicos

- [4] Zamora-Muñoz, C.; Sáinz-Bariáin, M.; Múrria, C.; Bonada, N., Sáinz-Cantero, C.; González, M. & Tierno de Figueroa, J. M. (2012). Diversidad, estrategias vitales y filogeografía de especies sensibles al cambio climático: Tricópteros en el Parque Nacional de Sierra Nevada. Pp.: 355–385. En: Ramírez, L. y Asensio, B. (Eds.). *Proyectos de investigación en parques nacionales: 2008-2011*. Organismo Autónomo de Parques Nacionales. MAGRAMA. Madrid.
- [5] Zamora-Muñoz, C. & Alba-Tercedor, J. (1992). *Caracterización y calidad de las aguas del río Monachil (Sierra Nevada, Granada). Factores físico-químicos y comunidades de macroinvertebrados acuáticos*. Agencia de Medio Ambiente. Ed. Anel, Granada. 171 pp.
- [6] Hewitt, G.M. (2000). The genetic legacy of the Quaternary ice ages. *Nature*, 405: 907-913.

- [7] Isaak, D.J. y Rieman, B.E. 2013. Stream isotherm shifts from climate change and implications for distributions of ectothermic organisms. *Global Change Biology*, 19: 742-751.
- [8] Hering, D.; Schmid-Kloiber, A.; Murphy, J.; Lücke, S.; Zamora-Muñoz, C.; López-Rodríguez, M.J.; Huber, T. & Graf, W. (2009). Potential impact of climate change on aquatic insects: A sensitivity analysis for European caddisflies (Trichoptera) based on distribution patterns and ecological preferences. *Aquatic Sciences*, 71(1), 3-14.

4.3. Seguimiento de las poblaciones de trucha común

- [9] Galiana-García, M.; Rubio, S. & Galindo, F.J. (2012). Seguimiento de las poblaciones de trucha común. Pp.: 44-45. En: Aspizua, R.; Barea-Azcón, J.M.; Bonet, F.J.; Pérez-Luque, A.J. & Zamora, R.J. (coords.). *Observatorio de Cambio Global Sierra Nevada: metodologías de seguimiento*. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía.
- [10] Klemetsen, A.; Amundsen, P.A.; Dempson, J.B.; Jonsson, B.; Jonsson, N.; O'Connell, M.F. & Mortensen, E. (2003). Atlantic salmon *Salmo salar*, brown trout *Salmo trutta* L. and arctic charr *Salvelinus alpinus* (L.): a review of aspects of their life histories. *Ecology Freshwater Fish*, 12: 1-59.
- [11] Gortázar, J.; García de Jalón, D.; Alonso-González, C.; Vizcaíno, P.; Baeza, D. & Marchamalo, M. (2007). Spawning period of a southern Brown trout population in a highly unpredictable stream. *Ecology Freshwater Fish*, 16: 515-527.
- [12] Alonso, C.; Gortázar, J. & García de Jalón, D. (2010). Trucha común-Salmo trutta. En: *Enciclopedia Virtual de los Vertebrados Españoles*. Salvador, A.; Elvira, B. (Eds.). Museo Nacional de Ciencias Naturales, Madrid. Disponible en: <http://www.vertebradosibericos.org/>. Consultada en: 12 de diciembre de 2012.
- [13] García, A. & Braña, F. (1988). Reproductive biology of brown trout (*Salmo trutta* L) in the Aller river [Asturias, northern Spain]. *Polish Archives Hydrobiology*, 35: 361-373.

4.4. Centinelas del Cambio Global [I]: las algas mixotróficas en la Laguna de La Caldera

- [14] Carrillo, P.; Villar-Argaiz, M.; Medina-Sánchez, J.M.; Delgado-Molina, J.A.; Bullejos, F.J.; Rosillo, S.; Durán, C.; Figueroa, F.L. & Korbee, N. (2009). Especies claves en el funcionamiento de las redes tróficas pelágicas de ecosistemas de alta montaña: estrategias adaptativas. Pp: 145-174. En: *Proyectos de investigación en Parques Nacionales: 2005-2008*. Ramírez, L. & Asensio, B. (Eds.).
- [15] Medina-Sánchez, J.M.; Villar-Argaiz, M. & Carrillo, P. (2004). Neither with nor without you: a complex algal control on bacterioplankton in a high mountain lake. *Limnology & Oceanography*, 49: 1722-1733.
- [16] Bullejos, F.J.; Carrillo, P.; Villar-Argaiz, M. & Medina-Sánchez, J.M. (2010). Roles of phosphorus and ultraviolet radiation in the strength of phytoplankton-zooplankton coupling in a Mediterranean high mountain lake. *Limnology & Oceanography*, 55: 2549-2562.
- [17] Carrillo, P.; Delgado-Molina J.A.; Medina-Sánchez, J.M.; Bullejos F.J. & Villar-Argaiz, M. (2008). Phosphorus inputs unmask negative effects of ultraviolet radiation on algae in a high mountain lake. *Global Change Biology*, 14: 423-439.
- [18] Delgado-Molina, J.A.; Carrillo, P.; Medina-Sánchez, J.M.; Villar-Argaiz, M. & Bullejos, F.J. (2009). Interactive effects of phosphorus loads and ambient ultraviolet radiation on the algal community in a high-mountain lake. *Journal of Plankton Research*. 31: 619-634.

4.5. Centinelas de Cambio Global [II]: los consumidores herbívoros en la Laguna de La Caldera

- [19] Villar-Argaiz, M.; Medina-Sánchez, J.M.; Cruz-Pizarro, L. & Carrillo, P. (2001). Inter- and intra-annual variability in the phytoplankton community of a high mountain lake: The influence of external (atmospheric) and internal (recycled) sources of phosphorus. *Freshwater Biology*, 46: 1017-1034.
- [20] Carrillo, P.; Delgado-Molina, J.A.; Medina-Sánchez, J.M.; Bullejos, F.J. & Villar-Argaiz, M. (2008). Phosphorus inputs unmask negative effects of ultraviolet radiation on algae in a high mountain lake. *Global Change Biology*, 14: 423-439.
- [21] Morales-Baquero, R.; Pulido-Villena, E. & Reche, I. (2006). Atmospheric inputs of phosphorus and nitrogen to the Southwest Mediterranean region: Biogeochemical responses of high mountain lakes. *Limnology and Oceanography*, 51: 830-837.
- [22] Psenner, R. (2010). Living in a dusty world: Airborne dust as a key factor for alpine lakes. *Water, Air & Soil Pollution*, 212: 217-227.
- [23] Ridame, C. & Guieu, C. (2002). Saharan input of phosphate to the oligotrophic water of the open Western Mediterranean Sea. *Limnology and Oceanography*, 47: 856-869.



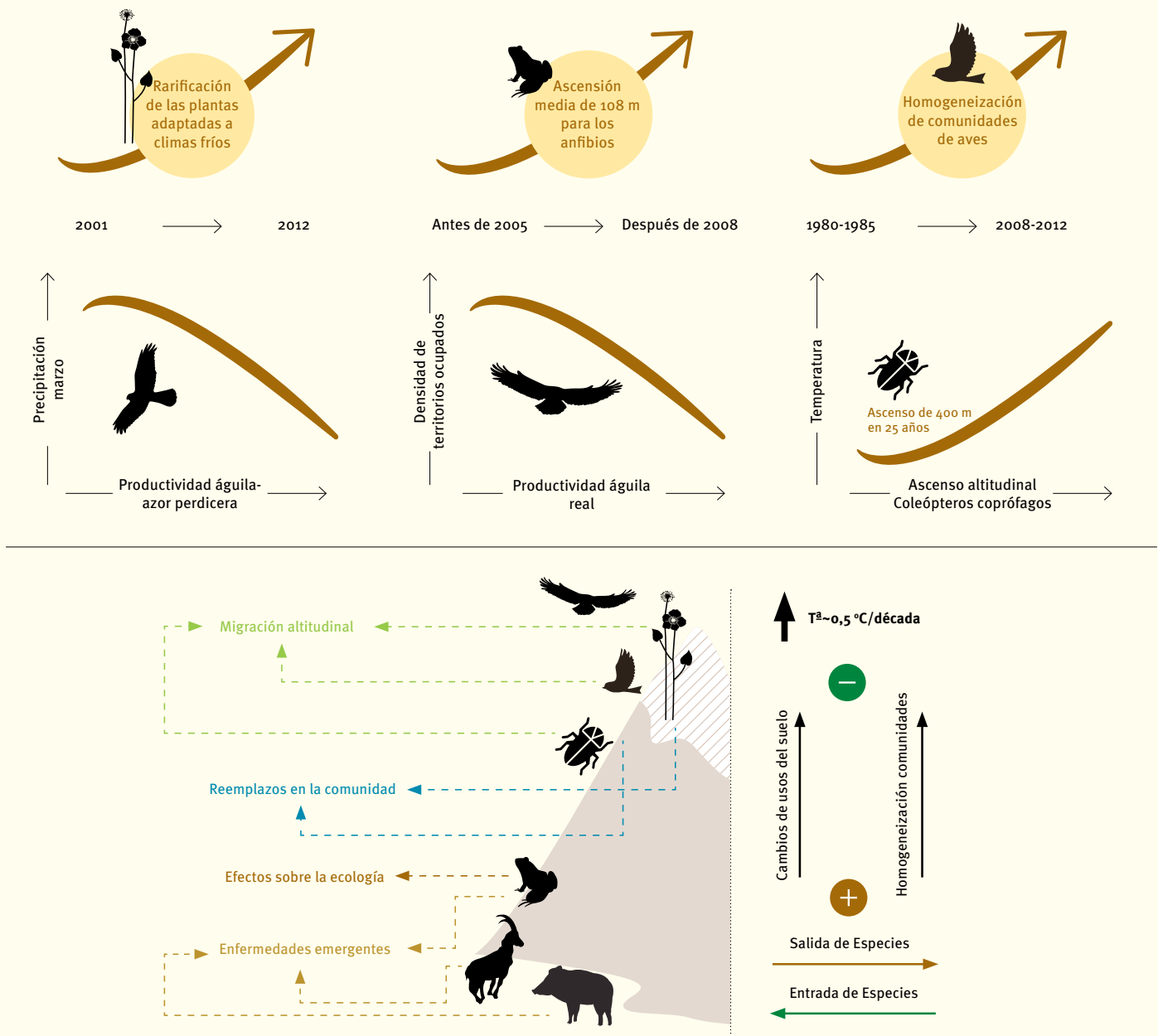
Tendencias poblacionales

Los cambios en la distribución y abundancia de las poblaciones de especies animales y vegetales constituyen una respuesta evidente a las alteraciones ambientales. Por lo tanto, el seguimiento de las tendencias poblacionales es una herramienta esencial para evaluar la capacidad de adaptación de las especies en un contexto de cambio global. En el presente capítulo se revisan varios casos de estudio sobre los cambios en la distribución y abundancia observados en las especies animales y vegetales de Sierra Nevada. Uno de los patrones más comunes (en Sierra Nevada y en otros sistemas montañosos) entre diferentes grupos taxonómicos consiste en un desplazamiento altitudinal hacia cotas superiores buscando entornos climáticos más frescos en los que resguardarse de unas temperaturas

que, en los últimos treinta años, han experimentado un incremento significativo (ver capítulo 1). En insectos, esta migración altitudinal ha sido confirmada para los escarabajos coprófagos como modelo de estudio. Los resultados muestran que en un lapso de 25 años, el 89% de las especies incrementaron su altitud media y sus límites de distribución superiores y algo más del 84% incrementaron sus límites de distribución inferiores. Especialmente paradójico es el caso de *Bubas bubalus*, el cual ha ascendido nada menos que 1.200 m en 25 años (~50 m/año). El ascenso medio altitudinal de los coleópteros coprófagos de Sierra Nevada fue de 400 metros, lo cual viene a coincidir con un ascenso de la misma magnitud en la mariposa apolo de Sierra Nevada. En el caso de los himenópteros formi-

cidos también se ha comprobado un ascenso altitudinal en, al menos, dos especies (*Proformica longiseta* y *Formica fusca/lemanii*), que incrementaron sus límites de distribución superiores en unos 200 metros en la vertiente sur.

Entre los vertebrados, también se han constatado respuestas equivalentes. Las aves paseriformes de montaña han mostrado a lo largo de los últimos 30 años una marcada dinámica temporal, que se ha visto muy condicionada por los efectos del cambio global. Las especies generalistas de montaña se consolidan en las zonas de cumbres, a la vez que se rarifican las especies de óptimo alpino. En las cotas medias se ha constatado un declive o incluso pérdida de especies de carácter montano que han sido



Resumen gráfico de los principales resultados descritos en el presente capítulo. Se muestran tendencias temporales de variables bióticas (gráficas con flechas), relaciones entre variables (gráficas con ejes) y representación esquemática de las principales repercusiones del cambio global sobre la biodiversidad de Sierra Nevada.

sustituidas por especies mediterráneas más termófilas. Los anfibios también parecen haber modificado sus distribuciones a lo largo de los últimos 30 años, especialmente la rana común y en menor medida el sapo común, el sapillo pintojo, el sapo partero bético y el sapillo corredor. La vegetación también sigue el mismo patrón y en tan sólo 11 años se ha podido constatar un ascenso altitudinal de tres especies (*Plantago*

radicata subsp. *granatensis*, *Pilosella castellana* y *Eryngium glaciale*). El estudio de comunidades vegetales de las cumbres muestra un progresivo incremento de la cobertura vegetal en estos sensibles ecosistemas. Este fenómeno es especialmente evidente por debajo de los 2.900 metros, mientras que por encima, la tendencia es de momento estable o incluso tiende a un ligero descenso.

Estos resultados ponen en evidencia que las áreas protegidas montañosas juegan un papel primordial en el mantenimiento de la biodiversidad en un contexto de cambio global, ya que las poblaciones pueden adaptarse a los cambios desplazándose altitudinalmente, de acuerdo a sus requerimientos ecológicos.

5.1. Comunidades vegetales de alta montaña: GLORIA

Sánchez-Rojas, C.P.¹ y Molero-Mesa, J.²

¹ Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía ² Universidad de Granada

Resumen

Se exponen los principales resultados del seguimiento de vegetación de altas cumbres para Sierra Nevada durante los últimos 11 años recabados en el marco del proyecto GLORIA (*Global Observation Research Initiative in Alpine environments*). Los resultados muestran cambios en la cobertura de los taxones, que son más acusados en determinadas orientaciones y/o altitudes. La cobertura se incrementa más en la orientación sur y en las localidades situadas a menor altitud (<3.000 msnm), mientras que se ha constatado una disminución en la orientación este. Se ha detectado un reemplazo en las comunidades, con la pérdida de taxones como *Luzula hispanica* y *Poa minor nevadensis*, que suelen ir ligadas a condiciones de mayor humedad, lo que puede indicar un cambio en la disponibilidad de agua. Una interpretación de los datos obtenidos para toda Europa en el periodo 2001-2008 indica que las plantas de clima frío se retiran de las altas montañas, mientras que prosperan las adaptadas al calor. Sin embargo, una revisión posterior para Sierra Nevada parece indicar una inversión de dicha tendencia.

> Objetivos y metodología

Se han seleccionado 4 cimas que responden a un gradiente altitudinal comprendido entre los 2.700 y 3.300 metros de altitud. En cada cima el muestreo de la vegetación se ha estructurado en dos partes:

1. Muestreo detallado en 16 cuadrados permanentes de 1x1 m, delimitados por parcelas de 3x3 m emplazadas en las direcciones de los cuatro puntos cardinales. En ellos se registran por un lado la composición específica y la cobertura de cada componente (planta, suelo desnudo, roca, etc.) expresada en porcentaje, y por otro, la frecuencia de aparición de cada componente biótico o abiótico considerado.

2. Muestreo en ocho secciones del área cime-
ra. Las secciones quedan delimitadas por las direcciones principales y sendas líneas a 5 y 10 m de desnivel desde el punto central de la cima, situado en su zona más alta. Para cada sección se estima la composición de taxones y su cobertura correspondiente según una escala

de abundancia cualitativa en función de la representatividad (dominante, común, extendido, raro, muy raro o de presencia puntual). Se estima asimismo la representatividad, expresada en porcentajes de los diferentes tipos de superficie [1].

- Índice de térmicidad (S): $\Sigma(\text{rango de altitud}(\text{especie}_i) \times \text{cobertura}(\text{especie}_i)) / \Sigma \text{cobertura}(\text{especie}_i)$. El rango se asigna de acuerdo con la corología descrita en las obras de flora estandarizadas. Este índice da idea de la plasticidad de las especies de la comunidad para vivir a distintas altitudes. Valores altos indican presencia de especies con gran rango altitudinal de supervivencia.
- Índice de termofilización calculado como la diferencia del anterior entre distintos muestreos.

> Resultados

La diferencia de temperatura entre la cima situada a menor altitud y la más elevada (549 m de diferencia) es de 4,42°C. Las temperaturas más bajas en invierno y en verano se localizan en las localidades orientadas hacia el norte y hacia el oeste.

Riqueza: En total se han registrado 102 taxones, de los cuales 34 son endémicos exclusivos de Sierra Nevada y otros 16 béticos. Éstos pertenecen a 29 familias botánicas, entre las que destacan Asteraceae (n=17), Poaceae (n=15), Brassicaceae (n=11), Caryophyllaceae (n=10) y Lamiaceae (n=6). Conforme se asciende en altitud aumenta la proporción de endemismos, desde un 23% en las cimas más bajas hasta un 67% en las más elevadas [2].

Cobertura: se ha detectado un incremento en la cobertura respecto al año 2001. Esto se hace especialmente patente en las localidades orientadas hacia el sur, mientras que se aprecia el patrón contrario en localidades orientadas hacia el este. La cobertura ha incrementado en las localidades situadas por debajo de los 3.000 msnm, aunque desciende ligeramente en las localidades más elevadas (>3.000 msnm) (Figura 1).

Diversidad: en todas las escalas espaciales estudiadas (1x1 m, 3x3 m y a escala de cima) se ha observado una relación negativa entre la riqueza de especies y la altitud y positiva entre la riqueza de especies y la temperatura media del suelo [2].

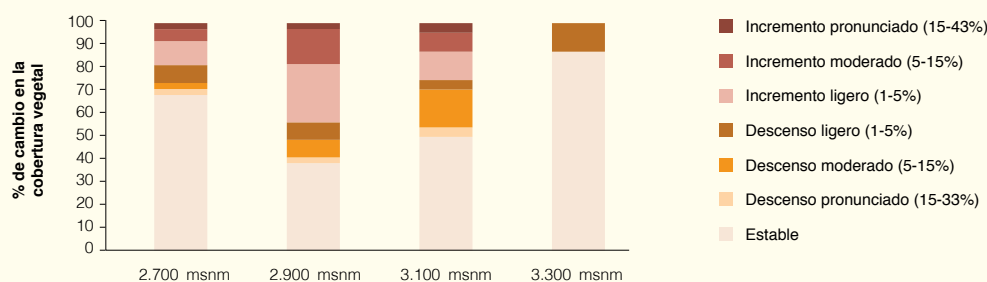
En cuanto a la evolución temporal, no hay cambios importantes en la composición de las comunidades en las localidades más elevadas. Sin embargo, en las menos elevadas se ha constatado la pérdida de 6 taxones. En el

conjunto de las localidades estudiadas se han detectado 13 desapariciones y 5 especies que no se habían observado previamente.

Se detectan migraciones altitudinales hacia cotas más altas de algunas especies (*Plantago radicata* subsp. *granatensis*, *Pilosella castellana* y *Eryngium glaciale*). Paralelamente se aprecia una tendencia negativa en el tamaño del área de distribución, que es especialmente acusada en *Lepidium stylatum*, *Viola crassiuscula* y *Saxifraga nevadensis*.

Índice de Termofilización (IT): la tendencia positiva del IT detectada en el periodo 2001-2008 se ha invertido en el periodo 2008-2012 (Figura 2). Este índice permite conocer la composición de la comunidad en cuanto a diversidad y cobertura de especies vegetales adaptadas a condiciones climáticas más frías o más cálidas. Los resultados para el periodo 2001-2012 muestran en general un descenso en la termofilización de las zonas de cumbres de Sierra Nevada.

Figura 1



Cambios en la cobertura de los taxones estudiados para el periodo 2001 a 2012.

➤ Discusión y conclusiones

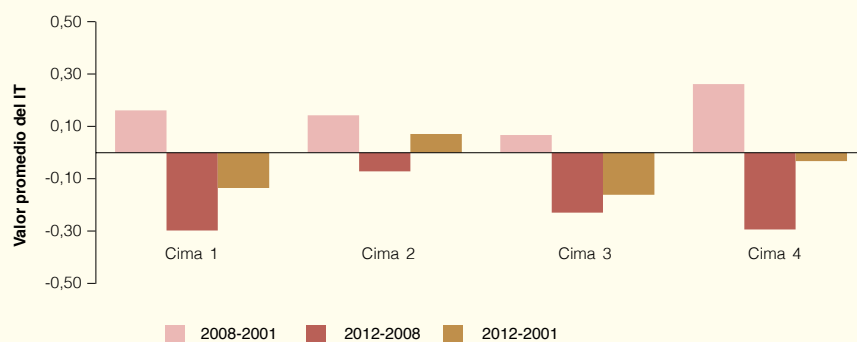
La última década ha sido la más cálida desde que existen medidas instrumentales de la temperatura. Este calentamiento está provocando cambios importantes en las zonas montañosas de Europa, que se traducen en una reducción de la extensión de las áreas donde se dan condiciones alpinas. Los resultados del proyecto GLORIA ponen de relieve importantes cambios en la vegetación de alta montaña, que implican principalmente: desapariciones y apariciones de especies, migraciones altitudinales y cambios en la cobertura vegetal. En las localidades estudiadas en Sierra Nevada se ha constatado la desaparición de 13 especies en 11 años, a la vez que se han detectado 5 táxones que no habían sido citados previamente. Especialmente acusada es la reducción en el área de distribución de *Lepidium stylatum*, *Viola crassiuscula* y *Saxifraga nevadensis*. Otras especies muestran un claro comportamiento ascendente (p.e.: *Plantago radicata* subsp. *granatensis*, *Pilosella*

castellana y *Eryngium glaciale*). Estos cambios concuerdan con lo observado en otros puntos de Europa, donde también se rarifican especies de los géneros *Saxifraga* (en el norte de Europa a lo largo de los últimos 80 años) o *Pilosella* (subida en altitud en el sur de los Alpes).

A escala del continente europeo, en el periodo 2001-2008 se aprecia una rarificación de las plantas mejor adaptadas a ambiente fríos, a la vez que prosperan las adaptadas al calor. Especies de plantas alpinas en 13 sistemas montañosos europeos templados y boreales se han desplazado hacia cotas altas 2,7 m en promedio en sólo siete años, y 2,5 m en las montañas mediterráneas [3]. El movimiento ascendente de las plantas más termófilas [4] ha llevado a un aumento en la riqueza de especies en cumbres boreales y templadas (3,9 especies por término medio), pero en el Mediterráneo el aumento de especies en las cumbres se ha visto superado

por las pérdidas de especies criofílicas, lo que resulta en una pérdida neta, en promedio, de 1,4 especies [3]. Estas observaciones han resultado independientes de la altitud y de la latitud, pues ocurren tanto en el límite del bosque como en las cimas y desde Escocia hasta Creta. Sin embargo, a escala de Sierra Nevada esta tendencia parece revertirse en el periodo 2008-2012. Los resultados obtenidos podrían estar mostrando la capacidad adaptativa de determinadas plantas ante un escenario de calentamiento global. Un seguimiento a largo plazo permitirá establecer tendencias en las dinámicas de extinción-colonización y expansiones-retracciones altitudinales. La interpretación de los resultados obtenidos en Sierra Nevada en un contexto geográfico más amplio también es fundamental a la hora de establecer patrones comunes en diferentes macizos montañosos de todo el Planeta.

Figura 2



Comparativa del Índice de Termofilización (IT) entre los periodos de seguimiento, expresado en términos de valor promedio por cima y periodo.



Festuca pseudoeskia en la localidad de Cúpula.

5.2. Tendencias de la flora de Sierra Nevada

Muñoz, J.M. y Sánchez-Rojas, C.P.

Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía

Resumen

El seguimiento anual de las poblaciones de *Laserpitium longiradium*, *Arenaria nevadensis*, *Gentiana lutea* subsp. *lutea* y *Senecio nevadensis* permite evaluar su estado de conservación e identificar los factores que condicionan su dinámica poblacional.

La población de *L. longiradium* no ha mostrado cambios netos en su distribución y abundancia, ni en su estructura poblacional en los últimos 14 años. El área de distribución de *A. nevadensis* disminuye a lo largo de la serie temporal, mientras que su densidad y de las especies acompañantes ha aumentado ligeramente.

G. lutea subsp. *lutea* también muestra unos rasgos demográficos estables, debido fundamentalmente a la longevidad de los ejemplares. En la anualidad siguiente a la instalación de los vallados de exclusión, el porcentaje de ejemplares reproductores con capacidad dispersora aumentó sustancialmente. Sin embargo, no se ha constatado la presencia de plántulas.

En cuanto a *S. nevadensis*, se ha observado un incremento poblacional a partir de los 3.000 msnm, mientras que por debajo de esta cota altitudinal se aprecian importantes disminuciones del número de individuos.

➤ Objetivos y metodología

Laserpitium longiradium: Para el seguimiento de la estructura poblacional, cada ejemplar se ha clasificado dentro de alguna de estas fases: plántulas, juveniles, adultos vegetativos y adultos reproductores.

Arenaria nevadensis: Se analiza la extensión, demografía y capacidad reproductora en dos poblaciones: Veta Grande (un núcleo) y Mulhacén (tres núcleos). Se ha contabilizado el número de individuos anualmente a través de transectos fijos. En cada localidad se han seleccionado 30 individuos al azar a los que se mide el tamaño y el número de estructuras reproductoras, así como la densidad midiendo las distancias mínimas inter e intraespecíficas.

Gentiana lutea subsp. *lutea*: Se ha registrado anualmente la fase vital (plántula, vegetativo o

reproductor), el tamaño de cada individuo, su capacidad reproductora a través de la cantidad de verticilos florales, el número de frutos y los daños por herbivoría. El impacto de la herbivoría se ha medido por contraste de las variables anteriores en áreas protegidas con vallados de exclusión ganadera frente a las adyacentes sin vallar, en cuatro tipos de microhábitat: pastizal, pastizal-piornal, piornal y pedregal.

Senecio nevadensis: Se ha estudiado la abundancia de esta especie en parcelas con una superficie circular de 10 m de diámetro distribuidas a lo largo de un gradiente altitudinal entre las cotas 2.775 y 3.150 msnm. El rango altitudinal descrito para la especie abarca los 2.600-3.300 msnm [5].

➤ Resultados

Tras estos catorce años de seguimiento la estructura demográfica de *L. longiradium* es estable, aunque sujeta a ligeras fluctuaciones anuales (Figura 1a y b). Los ejemplares vegetativos predominan claramente, seguidos por los juveniles, reproductores y finalmente por las plántulas. El número de adultos reproductivos y de las plántulas que se encuentran dos años después (reclutamiento) están correlacionados ($\rho_2 = 0,514$). También existe una correlación entre los juveniles y adultos vegetativos considerando un retraso de uno y dos años ($\rho_1 = 0,844$, $\rho_2 = 0,803$).

Se ha observado una disminución del área de distribución de *A. nevadensis* a la par que un ligero incremento de la densidad (Figura 2a). También ha aumentado la densidad de las especies acompañantes (Figura 2b).



La disminución del área de distribución es más clara en el núcleo de Veta Grande, mientras que los de Mulhacén se presentan mayores fluctuaciones entre años (Figura 3a). El promedio de estructuras reproductoras ha descendido en el periodo de observación (Figura 3b).

La población de *G. lutea* subsp. *lutea* no ha variado sustancialmente en los últimos 5 años. La tasa de crecimiento se ha mantenido estable. No se ha constatado la presencia de plántulas ni la muerte de ningún ejemplar. Es frecuente el fenómeno de latencia.

Según se concluye del análisis de elasticidad [6] los ejemplares que permanecen como vege-

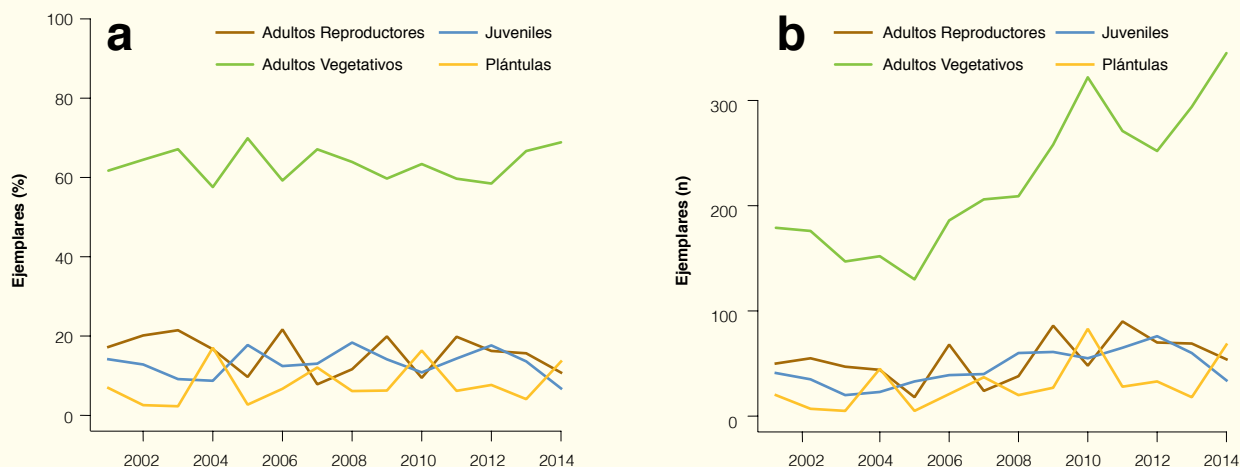
tativos en primer lugar y los que pasan a ser reproductores en segundo, son las transiciones que más aportan a la estabilidad del tamaño poblacional (Figura 4).

Los vallados de exclusión ganadera benefician de forma muy evidente la capacidad reproductora de esta especie. Los ejemplares reproductores del interior de los vallados (Figura 5) han aumentado significativamente ($\chi^2=96,95$, $p\text{-valor} < 0,001$) así como su capacidad de producir un mayor número de frutos ($\chi^2=188$, $p\text{-valor} < 0,001$).

El número de individuos de *S. nevadensis* se ha mantenido, en general, estable considerando el

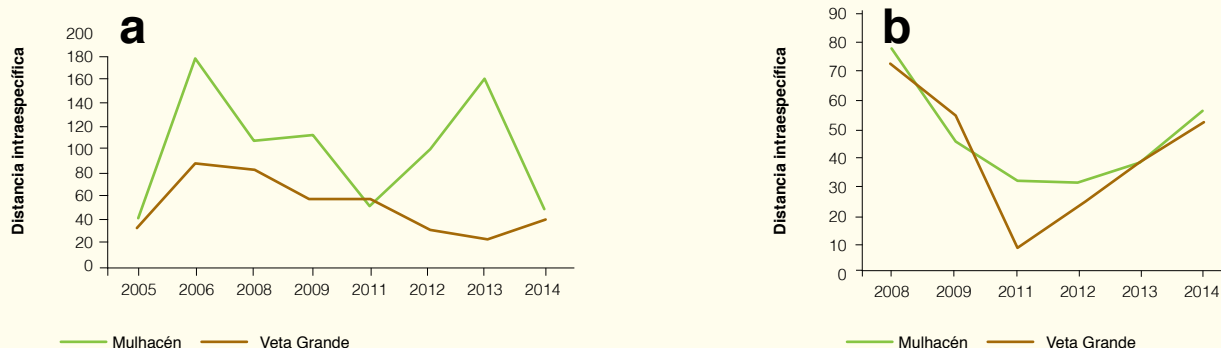
total de las localidades estudiadas durante los últimos cuatro años. Las poblaciones situadas por encima de los 3.000 msnm presentan un ligero incremento en su abundancia, mientras que las situadas por debajo presentan el patrón inverso (Figura 6). De hecho, en el 50% de las localidades estudiadas la abundancia descendió (la mayoría de ellas por debajo de 3.000 msnm) mientras que en el 42% incrementó y en el 8% se mantuvo estable. El número de reproductores se redujo considerablemente a lo largo del periodo estudiado (Figura 7).

Figura 1



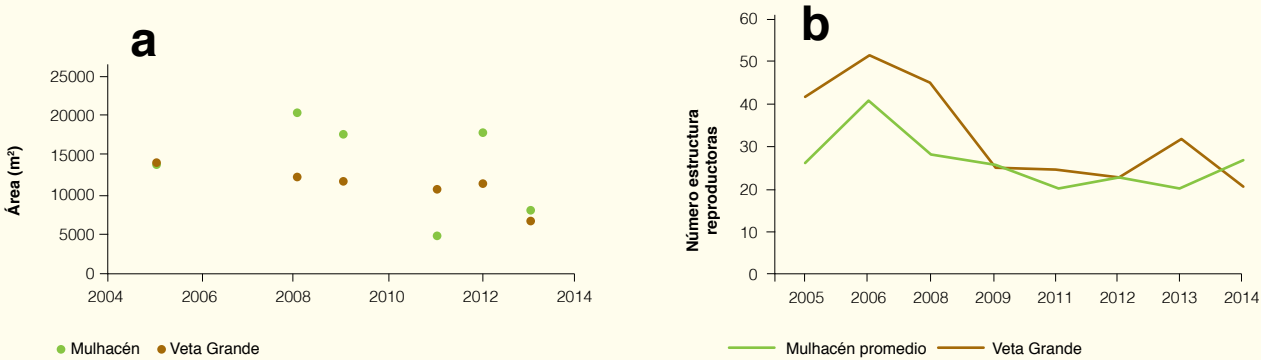
Evolución temporal de cada estado de desarrollo de la población de *L. longiradium*. a) valores relativos (%). b) en valores absolutos.

Figura 2



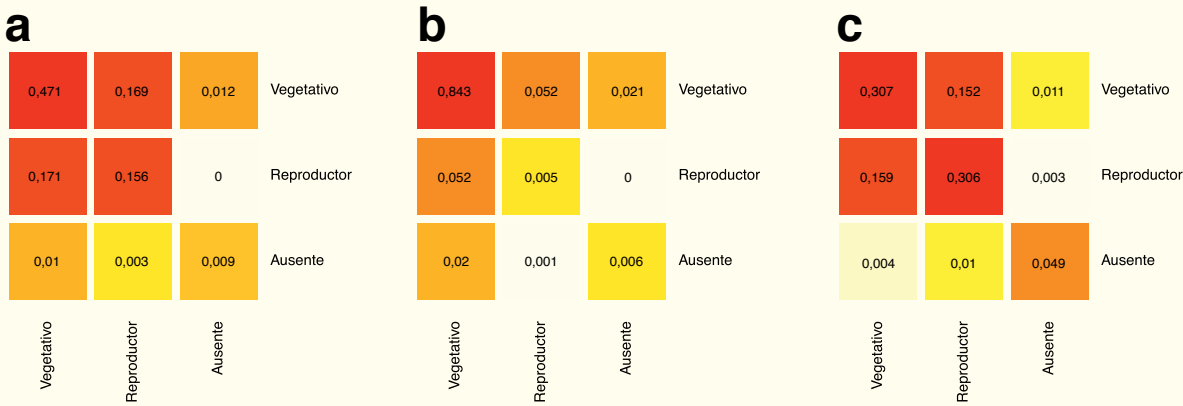
Evolución de la densidad de individuos de *A. nevadensis* en comparación con la de otras especies del hábitat (expresada como distancia media al individuo más próximo en cm, $n=30$). Distancia intraespecífica (a) e interespecífica (b).

Figura 3



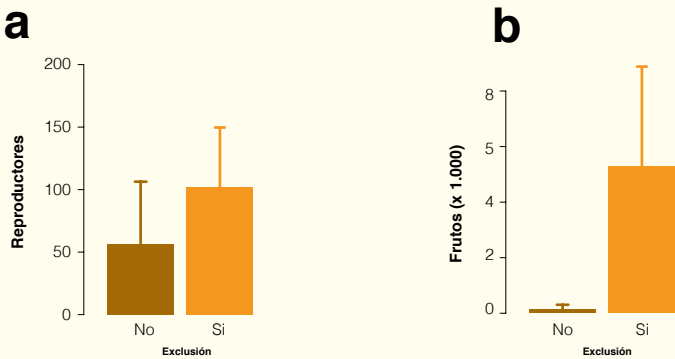
Cambios temporales en el área de distribución (a) y en el número de estructuras reproductoras por localidad (b) de *A. nevadensis* durante el período 2005-2014 (n=30).

Figura 4



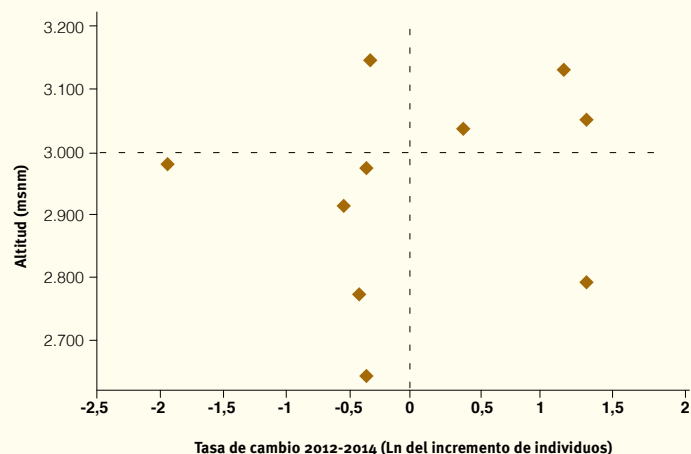
Gráficos de elasticidad de la población de *G. lutea* subsp. *lutea*. (a) General entre 2010 y 2014. (b) Transiciones 2010 y 2011. (c) transiciones 2013-2014.

Figura 5



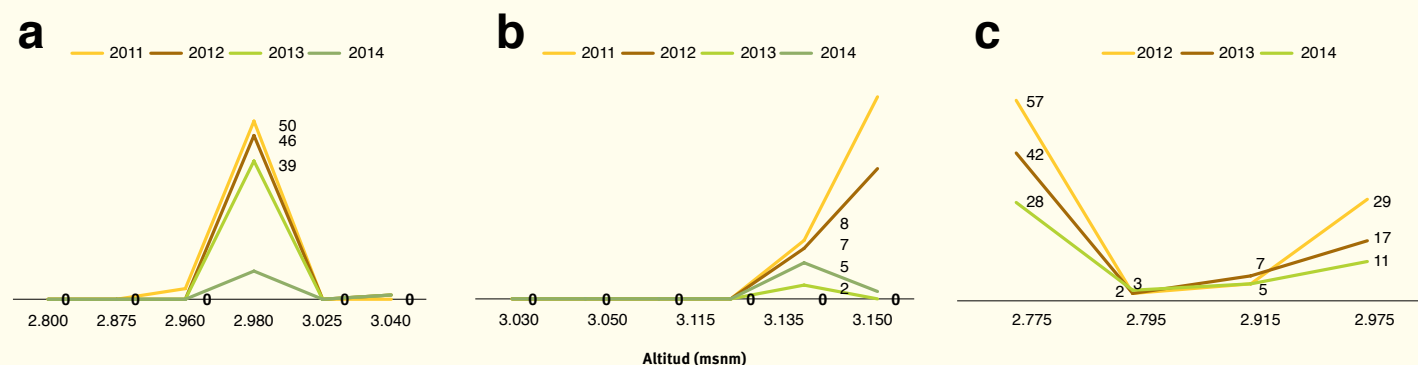
Incremento por efecto de la exclusión de ganadería de: (a) Ejemplares reproductores y (b) Generación de cápsulas.

Figura 6



Evolución de la abundancia de individuos de *Sencio nevadensis* a lo largo de un gradiente altitudinal (para el conjunto de localidades muestreadas: Veta Grande, Mulhacén y Veleta).

Figura 7



Evolución de los reproductores de *Sencio nevadensis* (2011-2014) en cifras absolutas: (a) Mulhacén, (b) Veleta y (c) Veta Grande.

➤ Discusión y conclusiones

Las poblaciones de *L. longiradium* (14 años de seguimiento), *A. nevadensis* (9 años de seguimiento), *G. lutea* subsp. *lutea* (4 años de seguimiento) y *S. nevadensis* (4 años de seguimiento) presentan una tendencia estable a corto plazo. *Laserpitium longiradium* no presenta cambios en su estructura poblacional durante el periodo analizado. Su continuidad solo depende del mantenimiento de las características del hábitat que ocupa y de la continuación de las medidas de conservación iniciadas.

En cuanto a *Arenaria nevadensis*, las poblaciones mantienen una relativa estabilidad considerando las fluctuaciones propias de una especie anual de estos ambientes de alta montaña. La densidad es variable para el periodo estudiado, sobre todo en la localidad de Veta Grande, pero se aprecia una tendencia al incremento. La capacidad reproductora (número de estructuras reproductoras) sigue una tendencia descendente. A pesar de lo expuesto, la continuidad de la especie está sujeta a riesgos derivados

de su restricción a enclaves aislados. En este sentido los resultados de los estudios genéticos [7] apuntan a una baja capacidad de dispersión como factor limitante de la expansión de la especie y a un riesgo de depresión génica por consanguinidad dado el bajo flujo genético entre sus núcleos poblacionales.

El seguimiento de *Gentiana lutea* subsp. *lutea*, nos ha permitido evaluar la efectividad de los trabajos de conservación realizados. Aunque

muy beneficiosos para su capacidad reproductora, no se ha observado aún el esperado efecto positivo sobre el reclutamiento. Los análisis de elasticidad apuntan a que la longevidad de los ejemplares adultos es un factor clave en la continuidad de la población. Según indican otros trabajos [8] la viabilidad de las semillas es muy sensible al tamaño poblacional.

La población de *Senecio nevadensis* presenta tasas de crecimiento positivas en su límite superior altitudinal, por encima de los 3.000 msnm. Sin embargo este aumento no es generalizado en todas las localidades, por lo que pueden estar influyendo también otros factores como la estructura pedregosa e inestable del suelo y la herbivoría. La afección por herbívoros puede ser importante, tanto por el ramoneo como porque esta especie soporta una nitrificación moderada [9]. La tasa de reproductores ha disminuido en el periodo observado y presenta importantes fluctuaciones interanuales. Por su floración tardía, la especie se caracteriza por presentar importantes fluctuaciones en la producción de frutos y reclutamiento de plántulas en relación con años más fríos durante el periodo crítico para la reproducción [9] lo que puede explicar las diferencias observadas además de suponer una posible limitación para la especie.



Gentiana lutea subsp. *lutea*

5.3. Anfibios y cambio global en Sierra Nevada

González-Miras, E.¹; Ballesteros-Duperón, E.¹ y Benítez, M.²

¹ Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía ² Universidad de Granada

Resumen

Los anfibios, por sus particularidades fisiológicas y ecológicas, constituyen uno de los grupos más sensibles a los efectos del cambio global. Entre los años 2009-2013 se han estudiado diferentes aspectos de su ecología relacionados con la temperatura y la disponibilidad hídrica en Sierra Nevada. Los datos obtenidos permiten inferir cambios en las comunidades de anfibios de Sierra Nevada entre los que destacan: un desplazamiento de los anfibios en altitud, mayor competencia entre especies que se reproducen en medios permanentes, modificaciones en el tamaño de los metamórficos y la expansión de enfermedades emergentes.

➤ Objetivos y metodología

Se han recopilado todas las citas de anfibios y se han agrupado en dos periodos: citas antiguas (anteriores a 2005) y actuales (posteriores a 2008). Se compara la distribución altitudinal de las diferentes especies detectadas en los dos periodos considerados.

Se ha estudiado también la fecha de puesta de tres especies de anfibios en 60 masas de agua distribuidas a lo largo de un gradiente altitudinal y de orientación. De las especies estudiadas, dos se reproducen en medios permanentes (*Alytes dickhilleni* sapo partero bético y *Bufo spinosus* sapo común) y otra en medios temporales (*Bufo calamita* sapo corredor).

Se pesaron y midieron metamórficos de sapo partero bético en un gradiente altitudinal. Se midió también la temperatura del agua en continuo, empleando registradores automáticos (“dataloggers”) en 13 lugares de reproducción distribuidos a lo largo del gradiente. Los datos se recogieron de junio a octubre, a intervalos regulares de 30 minutos y se compararon con la temperatura óptima de crecimiento a fin de obtener el margen de seguridad térmica y la tolerancia al calentamiento.

Adicionalmente se ha realizado un seguimiento en 15 charcas temporales situadas a lo largo de tres gradientes altitudinales. Se registró el

hidroperíodo y el éxito reproductor para cada especie. En el caso del sapo partero bético se ha registrado el éxito en la metamorfosis en 18 zonas sometidas a distinto grado de manejo, con la finalidad de crear una red de alerta temprana de la quitridiomycosis. Finalmente, también para esta especie, se marcaron el 40-50% de las larvas de 5 arroyos (con elastómeros visibles). Se marcaron con diferentes colores para determinar los desplazamientos entre pozas.

➤ Resultados

En los últimos 30 años hay 5 especies que han ascendido altitudinalmente. Esta tendencia es significativa para la rana común (*Pelophylax perezi*), para el sapo común y para el sapillo pintojo (*Discoglossus jeanneae*) (Tabla 1 y Figura 1).

Para el sapo partero bético y el sapo común existe un claro retardo fenológico conforme ascendemos en altura (Figura 2), lo que está

claramente relacionado con la temperatura. Estas dos especies, que a menudo se reproducen en los mismos lugares, se encuentran actualmente desacopladas fenológicamente, lo cual puede reducir la posible competencia interespecífica [10].

Las larvas de la mayoría de las poblaciones de sapo partero bético en Sierra Nevada soportan temperaturas de agua bajas en relación a su

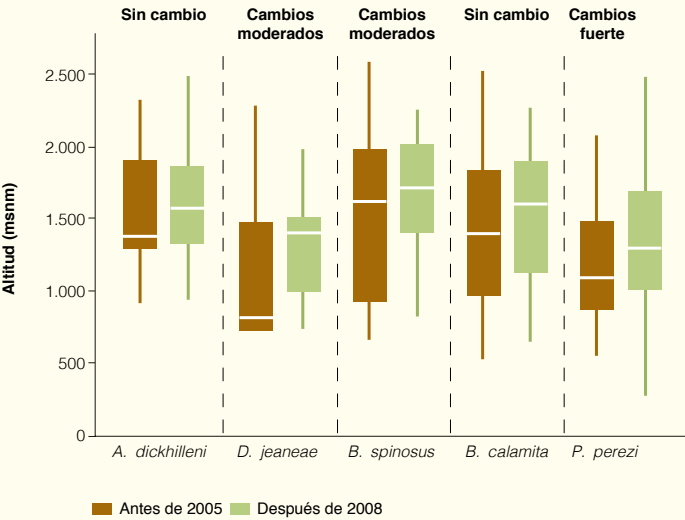
óptimo fisiológico, lo cual es especialmente patente en el caso de las que se reproducen en arroyos. Los medios artificiales estudiados presentan una temperatura más adecuada para el desarrollo de los anfibios. Aunque el desarrollo en los lugares fríos es más lento, el tamaño y el peso final de los metamórficos es mayor (Figura 3).

Tabla 1

Especie	Medio Acuático utilizado	N anterior 2005	N posterior 2008	Altitud media anterior 2005	Sd	Altitud media posterior 2008	Sd	W	t	g.l.	P
<i>A. dickhilleni</i>	Permanente	18	32	1.548,72	413,83	1.629,03	416,82		0,74	17	0,47
<i>B. spinosus</i>	Permanente	62	80	1.519,39	605,18	1.692,20	376,49		2,11	61	0,03*
<i>B. calamita</i>	Temporal	23	26	1.445,65	556,15	1.497,38	501,66		1,21	22	0,24
<i>P. perezi</i>	Permanente	85	130	1.215,36	426,90	1.306,63	487,47		9,23	84	0,00**
<i>D. jeanneae</i>	Temporal	22	8	1.180,27	539,27	1.322,12	422,38	28	-----	-----	0,02*
<i>P. ibericus</i>	Temporal	2	-	1.482,00		-----			-----	-----	-----
<i>H. meridionalis</i>	Temporal	7	-	764,00		-----			-----	-----	-----

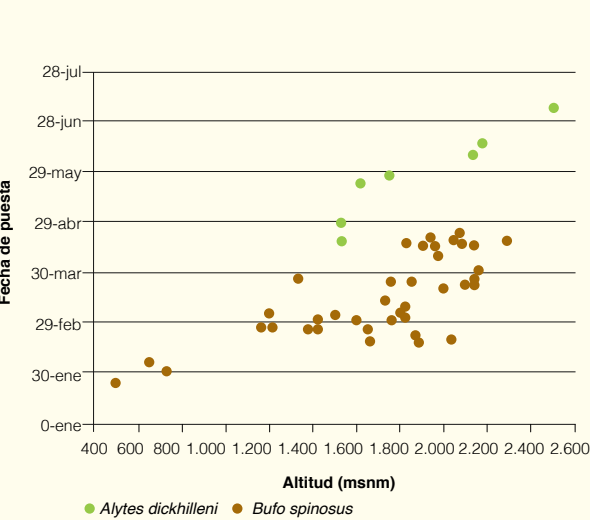
Número de citas y altitud media de los anfibios observados en los periodos anterior a 2005 y posterior a 2008, y resultados del test paramétrico *t* de Student para las especies con una distribución de citas ajustadas a la normalidad (test *Shapiro-Wilk*), excepto para *D. jeanneae* que se aplicó el test no paramétrico *Wilcoxon-Mann-Whitney*. Con asterisco aquellas especies con diferencias significativas.

Figura 1



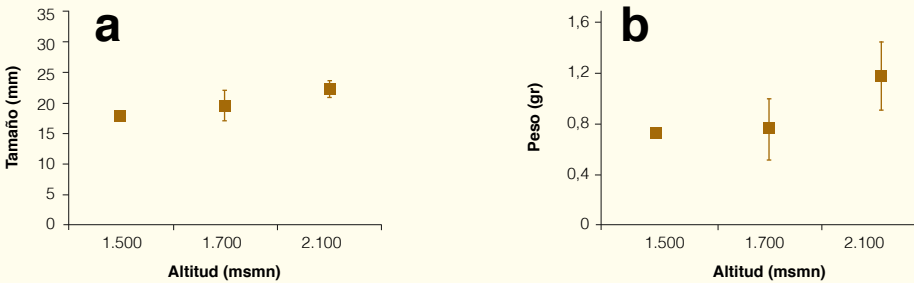
Comparativa mediante diagramas de caja de la distribución altitudinal media de las citas anteriores a 2005 y posteriores a 2008 de cinco especies de anfibios en Sierra Nevada.

Figura 2



Fecha de puesta en relación con la altitud para el sapo partero bético y para el sapo común.

Figura 3



(a) Tamaño y (b) peso medio de los metamórficos de sapo partero bético. Conforme se asciende en altitud, el peso y el tamaño de los metamórficos es mayor, siendo en ambas variables estas diferencias significativas. Test *Kruskal Wallis* para el tamaño: $X^2=7,092$; g.l.=2; p-valor < 0,05. Test *Kruskal Wallis* para el peso: $X^2=7,409$; g.l.=2; p-valor < 0,05.

Hasta la fecha no se ha detectado ningún caso de quitridiomycosis en Sierra Nevada. El incremento de la prevalencia de esta enfermedad en localidades próximas y las condiciones de Sierra Nevada, hacen pensar que el riesgo

de aparición de esta patología es elevado. Las particularidades de las poblaciones situadas en las zonas más elevadas las hace más sensibles a la incidencia de este hongo patógeno. Esto es debido a que la temperatura del agua que pre-

sentan estas localidades son las óptimas para el desarrollo de la enfermedad, de modo que un aumento de la temperatura sería en este caso beneficioso debido a que disminuiría en cierta medida el riesgo.

➤ Discusión y conclusiones

Los resultados obtenidos muestran que los anfibios en Sierra Nevada han experimentado un ascenso altitudinal medio de 107,8 m en el periodo 2008-2011 en relación con el periodo 1980-2005. De las siete especies estudiadas, tres muestran un claro patrón ascendente (sapillo pintojo, sapo común y rana común), dos no muestran patrón definido (sapo partero bético y sapo corredor) y otras dos han tendido a rarificarse y desaparecer (*Hyla meridionalis* rana meridional y *Pelodytes ibericus* sapillo moteado ibérico).

Las previsiones de ascenso de temperatura permiten predecir importantes cambios en las comunidades de anfibios de Sierra Nevada. Los principales cambios para los anfibios se muestran esquematizados en la Figura 4.

A nivel general, todo apunta a que las poblaciones de alta montaña se pueden ver beneficiadas por un aumento de la temperatura, mientras que

las de baja y media montaña corren serio riesgo de desaparecer, especialmente las que utilizan medios temporales [11]. En las poblaciones de alta montaña, un aumento de la temperatura del agua, implicaría un adelanto fenológico y una reducción del periodo larvario, lo que producirá una mayor tasa de crecimiento poblacional y una reducción del riesgo de padecer quitridiomycosis. En las localidades situadas en arroyos se espera un incremento en la frecuencia de riadas y otros fenómenos extremos. Además, los cambios previstos en la fenología de cría debido al cambio climático, pueden dar lugar a cambios en los ensamblajes de las comunidades de anfibios.

Las poblaciones de baja y media montaña están actualmente más cerca de unas condiciones óptimas desde el punto de vista fisiológico, pero corren serio riesgo de sufrir mayor estrés fisiológico y desaparecer si se produce un incremento excesivo de la temperatura del agua.

Bajo este escenario se producirá un descenso de la cantidad de oxígeno disuelto en agua, lo cual puede afectar negativamente al desarrollo de embriones y larvas.

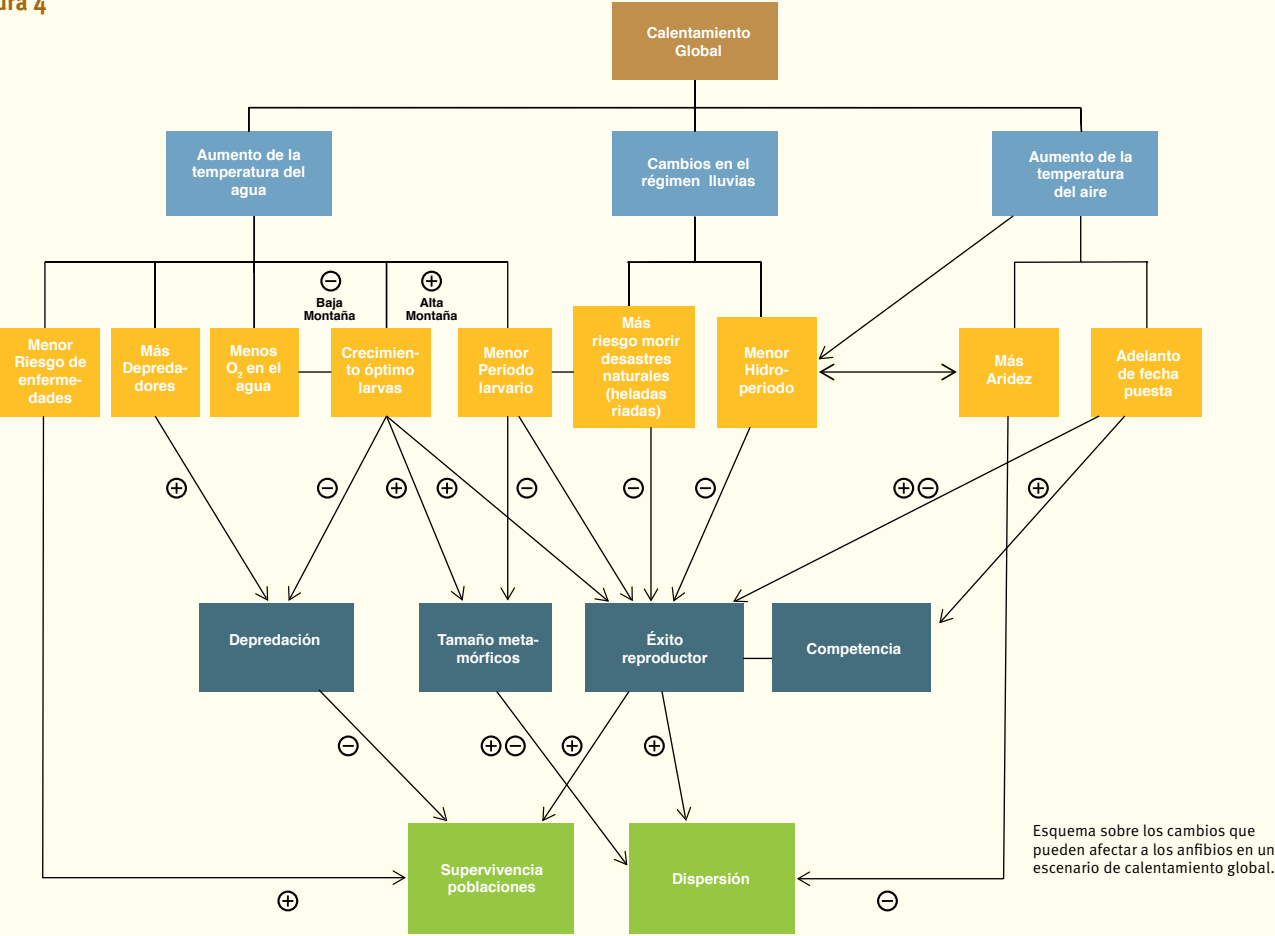
Medios temporales vs. medios permanentes

Se observa claramente una rarificación de las especies que se reproducen en medios temporales. Aún habiéndose realizado un mayor esfuerzo de muestreo después del 2008 que antes del 2005, el número de citas para estas especies es inferior, incluso algunas parecen haber desaparecido del Espacio Natural de Sierra Nevada (sapillo moteado y ranita meridional). De hecho, los datos disponibles apuntan a que las charcas temporales son las que peor estado de conservación presentan, a pesar de ser las que más diversidad soportan. Muchas de ellas tienen un hidroperiodo muy reducido, lo que puede verse agravado por el calentamiento global [12].



El sapillo pintojo es una de las especies que ha experimentado un ascenso altitudinal de mayor magnitud en Sierra Nevada.

Figura 4



Las charcas temporales y las especies que se reproducen en ellas, como el sapillo pintojo meridional, se verán muy afectadas por el calentamiento climático en Sierra Nevada.

5.4. Cambios en las comunidades de aves de Sierra Nevada

Zamora ,R.¹ y Barea-Azcón, J.M.²

¹Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía, Universidad de Granada ² Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía

Resumen

Se estudian los cambios en la composición y abundancia de las comunidades de passeriformes en un gradiente altitudinal, comparando los resultados obtenidos mediante censos realizados en tres hábitats diferentes (robleal, enebro-sabinar y ambientes de altas cumbres) a principios de los años 80, y en la actualidad. Los resultados indican que en los últimos 30 años se han producido cambios notables en la composición y, sobre todo, en la abundancia de las comunidades de aves passeriformes. Se aprecia una disminución poblacional significativa de muchas de las especies que eran dominantes en los años 80, particularmente en el robleal y en el enebro-sabinar. La magnitud de los cambios se reduce con la altitud, por lo que el ecosistema que más ha cambiado es el robleal y los que menos son los ecosistemas de altas cumbres. Las comunidades de aves en Sierra Nevada muestran una fuerte dinámica espacio-temporal que parece estar acentuándose a causa de la incidencia del cambio global.

➤ Objetivos y metodología

Se han comparado los censos de aves reproductoras realizados a comienzos de los años 80 y en la actualidad (2008-2012). Las localidades estudiadas fueron las mismas en ambos periodos: un robleal ubicado a 1.700 msnm, un área de matorral de alta montaña (dominada por pino, enebro y sabinar) a 2.200 msnm y la

zona de altas cumbres, en torno a 3.100 msnm. Los censos se llevaron a cabo a lo largo de transectos lineales con un ancho de banda fijo de 50 m, 25 a cada lado del observador. El esfuerzo de muestreo fue similar en ambos periodos [13]. Los datos históricos fueron recabados por R. Zamora a lo largo de la primera mitad de la dé-

cada de los 80 (robleal: 1981, matorral de alta montaña: 1982, 1985 y 1986 y altas cumbres: 1982)[14 a 17]. Los censos actuales se realizaron en el marco del Observatorio del Cambio Global de Sierra Nevada desde el año 2008 hasta el año 2012. Los censos se llevaron a cabo durante el periodo reproductor.

➤ Resultados

a) Robleal (1.700 msnm):

En 1981 se registran 21 especies en un solo año, mientras que la media de especies/año registradas en el periodo actual es de 18,8±3,7. En el periodo 2008-2012 se registran 31 especies. Hay 6 especies que no se registraron en 1981 y que actualmente han sido localizadas en, al menos, tres periodos reproductores: mito europeo (*Aegithalos caudatus*), Herrerillo capuchino (*Lophophanes cristatus*), colirrojo tizón (*Phoenicurus ochuros*), reyezuelo sencillo (*Regulus ignicapillus*), trepador azul (*Sitta europaea*) y curruca carrasqueña (*Sylvia cantillans*). Por otro lado, hay 3 especies que a pesar de ser

localizadas con frecuencia en 1981, actualmente no han sido registradas en ninguno de los censos realizados: jilguero (*Carduelis carduelis*) y oropéndola (*Oriolus oriolus*) y pito real (*Picus viridis*). En consecuencia, la tasa de reemplazo es del 37,9 %.

La densidad de aves en 1981 era de 108,1 aves/10 ha, mientras que actualmente es de 37,5 aves/10 ha. Esto se debe principalmente a la regresión de las especies dominantes en 1981, sobre todo herrerillo común, mosquitero papialbo (*Phylloscopus bonelli*), arrendajo (*Garrulus glandarius*) y mirlo (*Turdus merula*).

b) Matorral de alta montaña (2.200 msnm):

No se detectan cambios importantes en la diversidad (1982, 1984 y 1985: 9,7±1,5 especies/año y 2008-2012: 9,4±1,1 especies/año). En total se detectan 9 especies comunes a ambos periodos y una tasa de reemplazo de la comunidad del 29,07 %. Uno de los cambios más destacables consiste en la aparición de la tarabilla europea (*Saxicola rubicola*), que no fue detectada en los 80 y que es un ave común actualmente. También destaca la sustitución de la curruca zarcera (*Sylvia communis*) por una curruca de carácter más mediterráneo como la tomillera (*Sylvia conspicillata*). Especies como la totovía (*Lullula*

arborea), la cogujada montesina (*Galerida thecklae*) o el acentor común (*Prunella modularis*) se detectaron en los censos actuales, pero no hace 30 años. Se produce un descenso en la densidad de aves, de 30,2 aves/10 ha en los 80 a 10,5 aves/10 ha en la actualidad. La abundancia de una especie clave de estos ecosistemas como la collalba gris (*Oenanthe oenanthe*) desciende drásticamente de 10,1 aves/10 ha en los 80 a 2,3 aves/10 ha en la actualidad.

c) Altas cumbres (3.100 msnm):

Estos ecosistemas, caracterizados por una reducida ventana fenológica y una pobre comunidad ornítica, han experimentado cierta ganancia neta de especies en las últimas tres décadas. En 1982 se localizaron 3 especies, mientras que actualmente la cifra total asciende a 5 ($4 \pm 0,8$ especies/año). La tasa de reemplazo en este periodo es del 13,4 % y, al contrario que las otras dos localidades estudiadas, la

densidad se incrementa de 4 a 4,9 aves/10 ha. El pardillo (*Carduelis cannabina*) aparece como reproductor mientras que la población de colirrojo tizón se incrementa en los ecosistemas de las cumbres de Sierra Nevada. El acentor alpino se rarifica en este lapso de tiempo de 30 años.

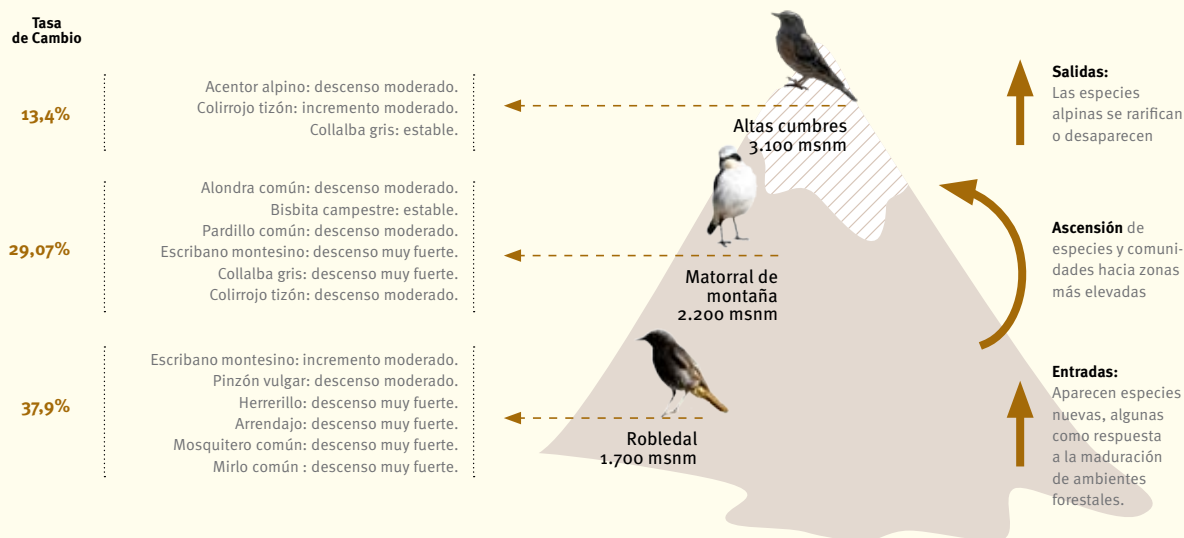
➤ Discusión y conclusiones

Los dos principales motores de cambio global en Sierra Nevada son los cambios en el clima y los cambios en los usos de suelo. El cambio en el clima para el periodo estudiado (1981-1986 vs. 2008-2012) ha consistido en un incremento de la temperatura cifrado en unos $0,105^{\circ}\text{C}$ anuales (ver capítulo 1). Los patrones de precipitación, por su parte, son poco regulares y presentan una tendencia incierta. En las zonas

bajas y medias los principales cambios en los usos del territorio en las últimas décadas han conducido a la expansión y densificación del bosque y matorral. Estos cambios en el clima y en los usos del suelo por sí solos no parecen explicar las sustanciales modificaciones en las comunidades de aves acaecidas a lo largo de los últimos 30 años. A pesar de que los valores netos de diversidad de especies no han sufrido

grandes modificaciones, sí que se ha comprobado un declive en la densidad de las especies que eran dominantes en los años 80, como la collalba gris en el enebro, o el herrerillo en el robledal, y una elevada tasa de reemplazo en la composición específica de la comunidad (26,8 % como promedio). El desacople observado entre cambios ambientales y cambios en las comunidades se relaciona con el carácter

Figura 1



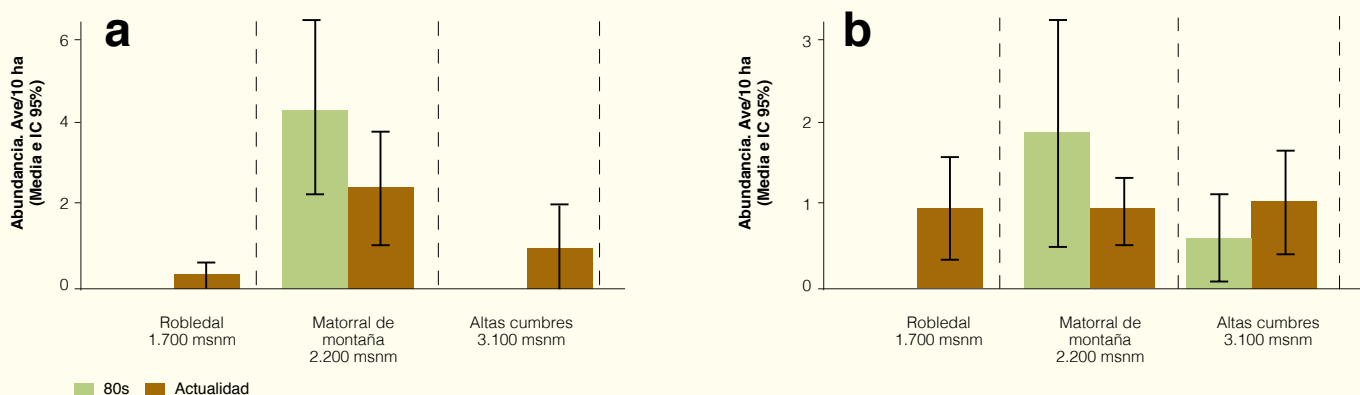
Esquema que resume los cambios acontecidos en la comunidad de aves de alta montaña a lo largo de los últimos 30 años en un gradiente altitudinal y de hábitats.

insaturado de las comunidades de montaña, expuestas a constantes entradas y salidas de especies. Paulatinamente, la comunidad de aves de la alta montaña de Sierra Nevada va perdiendo su carácter alpino, homogeneizándose con las condiciones mediterráneas de su entorno. El ejemplo más claro en la actualidad lo encontramos en el acentor alpino, pero

también detectamos huellas de este proceso en la desaparición de algunas especies alpinas que fueron vistas por los primeros naturalistas que visitaron Sierra Nevada en el siglo XIX, como el treparriscos (*Trychodroma muraria*), el gorrión alpino (*Montifringilla nivalis*) o la chova piquigualda (*Pyrrhocorax graculus*). Por el contrario, también se están dando condiciones

que representan oportunidades para especies con un perfil generalista, como pueden ser el colirrojo tizón o el pardillo, que ya colonizan la alta montaña.

Figura 2



Cambios en la distribución y abundancia de pardillo (a) y de colirrojo tizón (b) en el gradiente altitudinal de Sierra Nevada.



El acentor alpino (*Prunella collaris*) es la especie de ave nidificante en Sierra Nevada que más se asocia a las condiciones alpinas que aún persisten en las cumbres de Sierra Nevada.

5.5. Dinámica temporal de las poblaciones de aves rapaces rupícolas en Sierra Nevada

Martín, J.¹; Barea-Azcón, J.M.¹; López-Sanjuan, R.¹ y Gil-Sánchez, J.M.²

¹Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía · ²Wilder SOUTH Sociedad para el Estudio, Observación y Conservación de la Biodiversidad Mediterránea

Resumen

Se analiza la dinámica temporal de la población de águila real y halcón peregrino en Sierra Nevada durante las últimas 7 temporadas de reproducción y de águila-azor perdicera durante las últimas 12 temporadas. Las 23 parejas de águila real hacen de esta subpoblación una de las más importantes del sudeste ibérico. La mayor parte de las parejas reproductoras se distribuyen ocupando el eje axial de la cordillera y las zonas medias y altas de los grandes valles fluviales y glaciares. Las 15 parejas de águila-azor perdicera ocupan las zonas de mayor termicidad de la cordillera, coincidiendo con la orla carbonatada. Su tendencia a lo largo de los últimos 12 años es también estable, aunque su productividad sigue una tendencia fluctuante, probablemente condicionada por determinados parámetros climáticos. La población de halcón peregrino de Sierra Nevada se mantiene estable, con un ligero incremento hasta llegar a las 14 parejas.

➤ Objetivos y metodología

Se analiza la tendencia de las poblaciones de águila real (2008-2014), águila-azor perdicera (2003-2014) y halcón peregrino (2008-2014) en Sierra Nevada a partir de dos parámetros reproductivos de referencia: productividad y número de territorios ocupados. Tras la identificación de parejas reproductoras se lleva a cabo un seguimiento del proceso de reproducción basado en, al menos, tres visitas por unidad reproductora, a lo largo de las cuales se verifica la incubación, se comprueba el número

de pollos nacidos y, por último, se registra el número de pollos que vuelan. La productividad se ha calculado como el número total de pollos que vuelan/territorio ocupado. Un territorio se consideró ocupado cuando se observó un ave incubando, pollos en nido o cuando se constató la presencia habitual de ejemplares en el territorio a lo largo de diferentes visitas. Para analizar los efectos de la climatología sobre la productividad se realizó una regresión múltiple donde la variable dependiente fue la pro-

ductividad de cada una de las especies y las variables independientes fueron los promedios de las temperaturas mensuales y la precipitación acumulada en 6 estaciones meteorológicas representativas del área de estudio (de 600 a 2.150 msnm; media: 1.445,83 msnm). Se incluyó la temperatura y la precipitación mensual de enero a mayo, el promedio para estos 5 meses y el promedio para los 3 primeros meses como referente de las condiciones en las fases preliminares del periodo reproductor.

➤ Resultados

En Sierra Nevada se ha constatado la existencia de 23 territorios de águila real en 2014, frente a los 19 censados en 2008, al inicio del programa de seguimiento. Este valor supone una densidad de 1,34 territorios/100 km², que es superior a la densidad constatada para las provincias de Granada (0,46 territorios/100 km²) o de Almería (0,39 territorios/100 km²), y es similar a la descrita en otros sistemas montañosos de los Sistemas Béticos. La tendencia en la productividad es fluctuante a lo largo de

los últimos 7 años, alternando picos positivos y negativos en años sucesivos (Figura 1). El valor medio de este parámetro para el periodo 2008-2014 es de 0,8 pollos/territorio ocupado, lo cual está por debajo de la media andaluza para el año 2008 (1,04 pollos/territorio ocupado) y es idéntico a la media española para este mismo año (0,8 pollos/territorio ocupado)[18].

El águila-azor perdicera presenta 15 territorios en Sierra Nevada. La tendencia desde el año

2003 apunta a un ligero incremento que ha llegado a suponer la ganancia de 5 territorios, aunque desde 2013 se han perdido 2. La densidad de esta especie en Sierra Nevada es de 0,93 territorios/100 km², mientras que en el resto de Andalucía es de 0,37 territorios/100 km² y en España es de 0,15 territorios/100 km². Al igual que en el caso del águila real, la densidad de territorios es semejante a la de otras áreas montañosas de las Cordilleras Béticas. La productividad presenta una ligera



tendencia negativa debido a que en el año 2010 y en 2013 solamente llegaron a volar 7 pollos en un total de 10 territorios ocupados y a que en 2014 volaron 9 pollos y tan solo se ocuparon 9 territorios (Figura 2). Este desplome en la productividad también se registró en el resto de la provincia de Granada (Gil-Sánchez, datos inéditos). Aún así, el valor medio para el periodo 2003-2014 se sitúa en 1,23 pollos/territorio ocupado, lo cual es superior a la media andaluza para el año 2005 (1,17 pollos/territorio controlado) y muy superior a la media española para este mismo año (0,92 pollos/territorio controlado)[19].

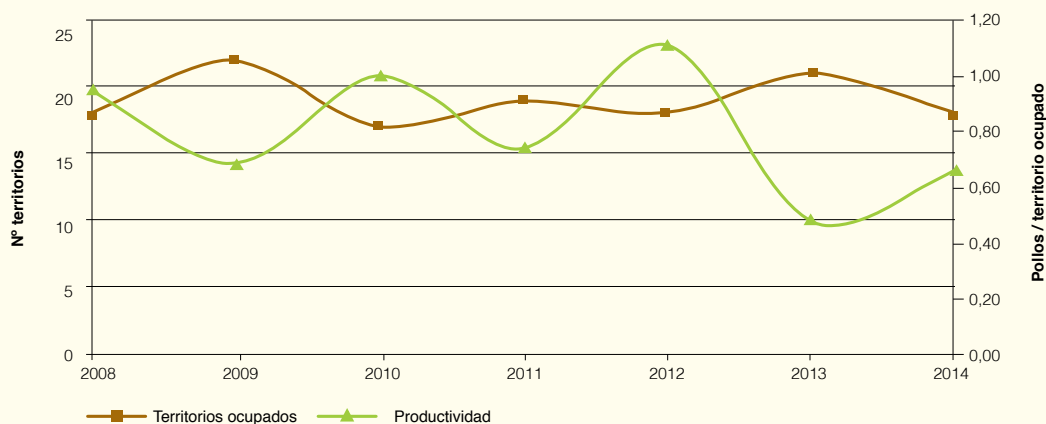
Desde que se inició el programa de seguimiento (2008), la población de halcón peregrino se ha incrementado desde los 11 a los 14 territorios, aunque es muy probable que el incremento no sea real sino debido a una mejora de cobertura. Esto implica una densidad de 0,81 territorios/100 km². Esta cifra es muy superior a la densidad para Andalucía en el año 2008 y también a la densidad en España en ese mismo año (0,32 y 0,49 territorios/100 km² respectivamente). La productividad de la población de halcón peregrino de Sierra Nevada para el periodo 2008-2014 es de 1,51 pollos/territorio ocupado (Figura 3). Esta cifra puede considerarse como moderada o incluso baja si tenemos en cuenta que la productividad media

andaluza y española se situaron en 1,74 y 1,42 pollos/territorio ocupado respectivamente en el año 2008 [20].

Influencia del clima sobre la reproducción de rapaces rupícolas en Sierra Nevada

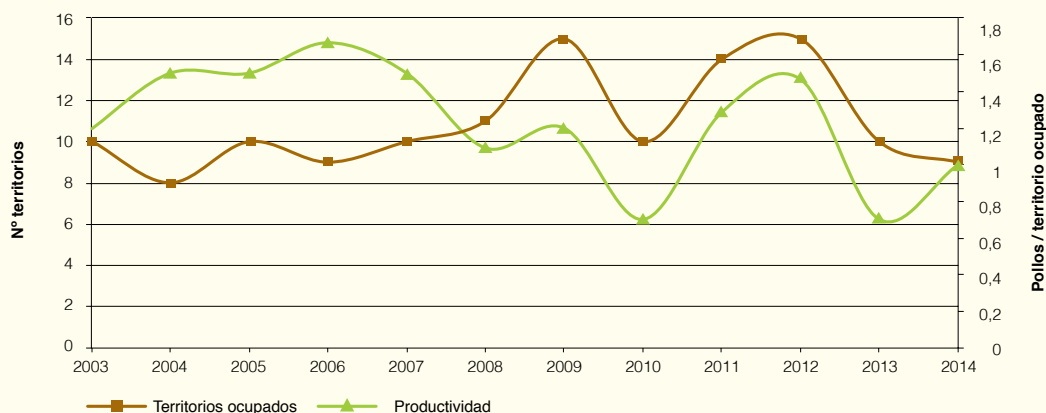
Solamente la productividad del águila-azor perdicera resultó estar influenciada por las variables climáticas contempladas en los análisis (p-valor <0,05). De este modo, los análisis multivariantes mostraron que la abundancia de precipitaciones durante el mes de marzo se correlaciona negativamente con la productividad de esta especie (Figura 4).

Figura 1



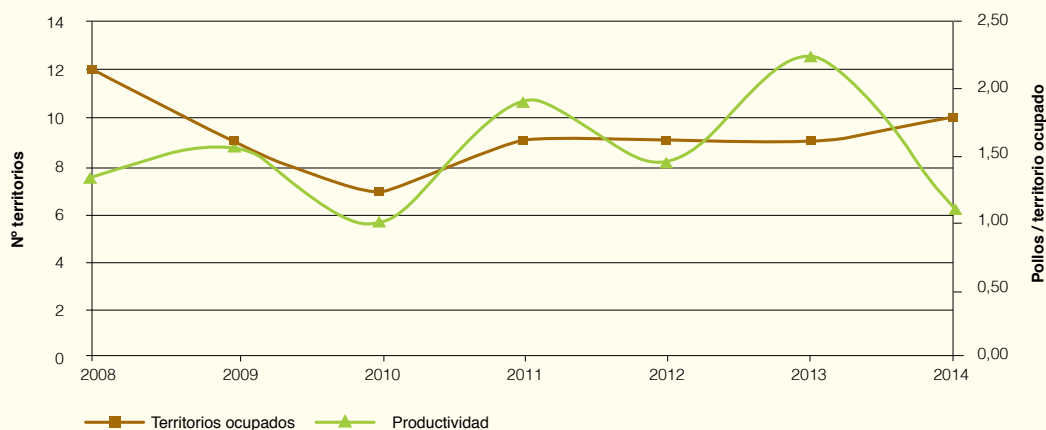
Productividad y número de territorios ocupados de águila real en Sierra Nevada. Valores anuales desde el año 2008.

Figura 2



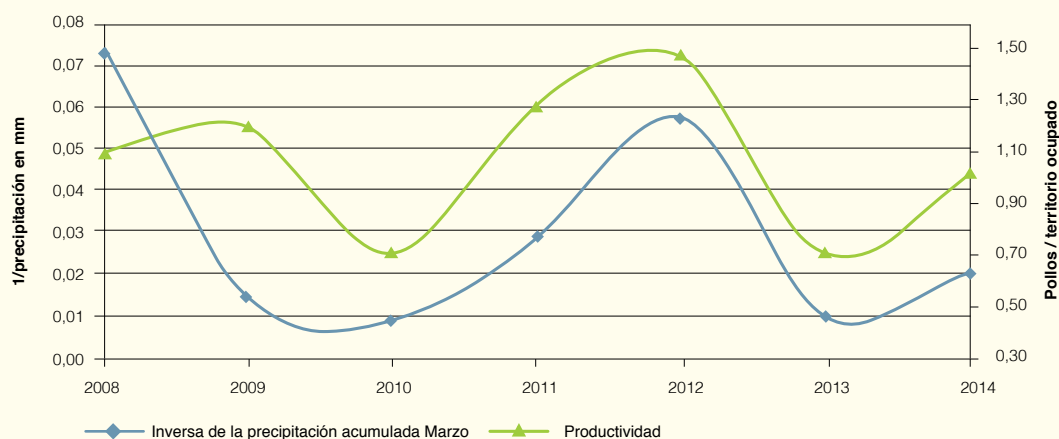
Productividad y número de territorios ocupados de águila-azor perdicera en Sierra Nevada. Valores anuales desde el año 2003.

Figura 3



Productividad y número de territorios ocupados de halcón peregrino en Sierra Nevada. Valores anuales desde el año 2008.

Figura 4



Relación entre productividad de águila-azor perdicera y precipitación acumulada durante el mes de marzo.

> Discusión y conclusiones

La población de águila real, con 23 territorios, es una de las más importantes del conjunto de las Sierras Béticas. La tendencia de la población ha experimentado en los últimos años debe de considerarse estable, porque el ligero incremento detectado se puede deber a una mejora en la cobertura del muestreo. La productividad de la

población durante los últimos 7 años presenta una tendencia fluctuante e inversamente relacionada con el número de territorios ocupados ($r_s = 0,71$; g.l. = 6; p-valor < 0,05). Esto se debe a que el número de pollos suele ser menor en aquellas temporadas de cría en las que el número de territorios ocupados es superior, si bien

esta relación no llega a ser estadísticamente significativa ($r_s = 0,49$; g.l. = 6; n.s.). Un incremento en el tamaño poblacional y una mayor proximidad al territorio de la misma especie más próxima repercuten negativamente sobre la productividad.

La población de águila-azor perdicera ha experimentado un incremento muy ligero desde el año 2003, lo cual contrasta con una clara tendencia al alza de la especie en el resto de Andalucía. En Sierra Nevada el águila real coloniza el eje axial de la cordillera y las zonas medias y altas de los grandes valles fluviales y glaciares. El águila-azor perdicera se restringe a entornos menos fríos y más antropizados, que coinciden con zonas periféricas y en buena medida con la orla carbonatada. Al contrario de lo que ocurre

en el caso del águila real, existe una relación positiva entre el número de territorios ocupados y el número de pollos nacidos ($r_s = 0,95$; g.l.= 6; $p\text{-valor} < 0,001$) durante las temporadas de reproducción de 2008 a 2014. No existe ningún tipo de relación entre ambos parámetros en las temporadas de reproducción de 2003 a 2007. Los análisis multivariantes entre precipitación acumulada y temperatura y los valores de productividad de la población de águila-azor perdicera en Sierra Nevada muestran una estrecha

relación entre la reducción de la precipitación durante el mes de marzo y el incremento de la productividad de esta especie. En consecuencia, las predicciones de reducción de la precipitación podrían beneficiar a esta especie [21]. En cualquier caso, el resultado final es difícilmente predecible debido a la existencia de fenómenos de competencia interespecífica con el águila real, cuya repercusión puede ser considerable a la hora de modular la tendencia del águila-azor perdicera a escala local [22].



Una pareja de águila real fotografiada en uno de los pocos territorios ubicados sobre sustratos calizos que hay en Sierra Nevada.

5.6. Demografía de poblaciones de ungulados silvestres y prevalencia de enfermedades

Granados, J.E.¹ y Cano-Manuel, F.J.²

¹Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía ²Parque Nacional y Parque Natural de Sierra Nevada

Resumen

Se exponen los resultados del seguimiento de las poblaciones de cabra montés y de jabalí en Sierra Nevada. En el caso de la cabra montés, el seguimiento se remonta al año 1960, mientras que en el caso de jabalí se inició en el año 2002. La cabra montés mantiene en Sierra Nevada la población más numerosa y con mayor variabilidad genética de la Península Ibérica. Su tendencia es positiva, aunque durante los últimos 20 años ese crecimiento se ha ralentizado. El jabalí presenta poblaciones estables como resultado del control poblacional, la escasez de alimento y probablemente por las enfermedades de carácter reproductivo. Se exponen también algunos resultados relacionados con la evolución de enfermedades infecciosas y parasitarias en la población de cabra montés y jabalí, que tiene gran interés debido a que la fauna silvestre se considera el reservorio más importante de más del 70% de todas las enfermedades emergentes.

➤ Objetivos y metodología

Se ha realizado un seguimiento de las poblaciones de cabra montés y jabalí en Sierra Nevada estudiando también los distintos agentes patógenos relevantes para ambas especies. La estima de densidad de la población de cabra montés se ha realizado por el método de transectos lineales. Los itinerarios de censo se basan en la distribución de los individuos observados a lo largo de recorridos seleccionados al azar en el área de estudio. Las estimas de la abundancia se obtienen en base a un modelo

relacionado con parámetros de la densidad que van a ser calculados. El observador detecta a un animal y asume que la probabilidad de detección es función de la distancia entre ambos. Cualquier variable continua distribuida al azar, como es la distancia de detección, viene definida por una función de probabilidad $[f(x)]$. El seguimiento de la sarna se realizó mediante observación directa, calculando la proporción entre animales enfermos y sanos.

Debido a las peculiaridades ecológicas del jabalí y a la extensa y continua estructura vegetal del área refugio, se consideró óptimo el método de las batidas de gestión para estimar la estructura poblacional y densidad de esta especie en Sierra Nevada. El estado sanitario de la población se ha realizado mediante el seguimiento epidemiológico de diversos agentes patógenos relevantes a través de encuestas serológicas y diversos índices epidemiológicos.

➤ Resultados

CABRA MONTÉS

Tendencia de la población de cabra montés en Sierra Nevada

Sierra Nevada alberga la población de cabra montés más numerosa y con mayor variabilidad genética de la Península Ibérica. Esta población ha aumentado en los últimos 40 años, pasando de una densidad estimada en 1960 de 1,29 ind/km² a unos 11,68 ind/km² estimados en 2012 (Figura 1). A tenor de los resultados obtenidos durante la monitorización de los

parámetros demográficos de la población en los últimos 20 años, podemos considerar que existe cierta estabilidad en la misma con una tendencia ligera al alza.

Estructura genética de la población

En Sierra Nevada se han descrito 4 de los 6 alelos conocidos para el MHC (Complejo Mayor de Histocompatibilidad) en el conjunto de las poblaciones estudiadas. Es bien sabido que altos niveles de polimorfismo pueden estar relacionados con la mayor capacidad de defensa

frente los agentes patógenos, mientras que las poblaciones que muestran una marcada homogeneidad genética pueden ser más susceptibles a las enfermedades parasitarias.

Sarna sarcóptica

Existen evidencias (textos históricos, infestación experimental y seguimiento de animales) que nos permiten asegurar la existencia de individuos resistentes a la sarna en la población de cabra montés de Sierra Nevada (Figura 2). La captura y marcaje de diferentes ejemplares afectados



por la sarna nos ha permitido conocer que la supervivencia media obtenida en Sierra Nevada supera los 209 días, lo cual es mucho mayor que los 90 días estimados para esta especie en el Parque Natural de las Sierras de Cazorla, Segura y Las Villas [23].

JABALÍ

Tendencia de la población de jabalí en Sierra Nevada

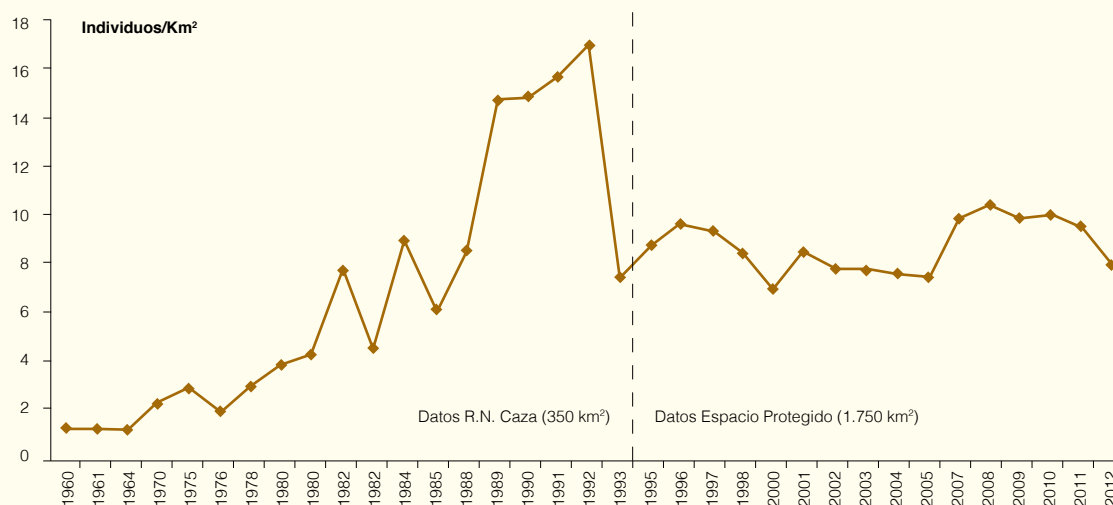
La presencia del jabalí en los ecosistemas de Sierra Nevada es muy reciente, ya que no se remonta más allá de 1975. A partir de recolonizaciones, la expansión fue rápida, aprovechando la enorme área forestal existente. La densidad media anual estimada en el área refugio (área forestal y de matorral denso) es de 8,5 individuos/km², y para todo el Espacio Natural de 2,6 individuos/km² [24]. A tenor de los resulta-

dos obtenidos, hemos constatado un descenso poblacional inicial tras la puesta en marcha del Plan de Gestión y una estabilidad posterior que continúa en la actualidad (Figura 3).

Estado sanitario de la población

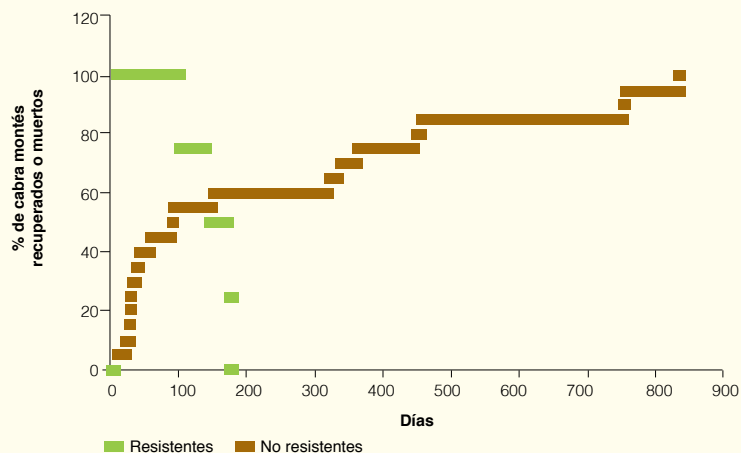
En la población de jabalíes de Sierra Nevada se constata una moderada, e incluso baja, carga infecciosa a nivel general. Se ha comprobado sin embargo, que las bajas tasas de circulación de patógenos detectados son suficientes para la existencia continuada de focos activos de infección en el tiempo y el espacio [25].

Figura 1



Evolución de la población de cabra montés en Sierra Nevada desde el año 1960.

Figura 2



Tasa de supervivencia de animales resistentes y no resistentes a la sarcoptidosis en la población de cabra montés de Sierra Nevada.



Hembra y cría de cabra montés.

➤ Discusión y conclusiones

CABRA MONTÉS

La evolución de la población de cabra montés en Sierra Nevada parece estar relacionada con la transformación sufrida por el hábitat que ocupa y el despoblamiento humano. Los factores climáticos no han tenido una implicación clara a la hora de explicar los resultados obtenidos. Las previsiones de calentamiento y la irregularidad de las precipitaciones tampoco permiten predecir una influencia negativa del clima en el tamaño de la población, que previsiblemente continuará aumentando numéricamente, favoreciendo la conectividad entre poblaciones. En estas condiciones las enfermedades, parasitarias fundamentalmente, podrían tener una mayor incidencia, afectando al tamaño y estructura de las poblaciones de este ungulado de montaña. Por ejemplo, en la población de Sierra Nevada, se ha puesto de manifiesto la relación existente entre prevalencia de sarcoptidosis y climatología. Determinadas enfermedades son sensibles al clima, influyendo sobre la frecuencia y distribución y los vectores de transmisión (pulgas, garrapatas, mosquitos, etc.) y pueden tener un impacto no solo sobre la salud humana, sino también

sobre la cabaña ganadera y sobre la fauna silvestre, sobre todo en el caso de especies amenazadas, que pueden ser empujadas a la extinción por eventos estocásticos. La fauna silvestre se considera el reservorio más importante de más del 70% de todas las enfermedades emergentes. La interacción de estas variables en un determinado tiempo y lugar tiene como consecuencia el establecimiento de escenarios epidemiológicos propicios para la emergencia y reemergencia de enfermedades infecciosas vectoriales y zoonóticas. Estos riesgos deben ser mejor conocidos y requieren mecanismos nuevos de vigilancia y de prevención. Por eso, la población de cabra montés de Sierra Nevada está siendo intensamente monitorizada, no solo a nivel poblacional sino también respecto a las enfermedades que le afectan, integrando la vigilancia epidemiológica con aspectos ecológicos, demográficos y reproductivos.

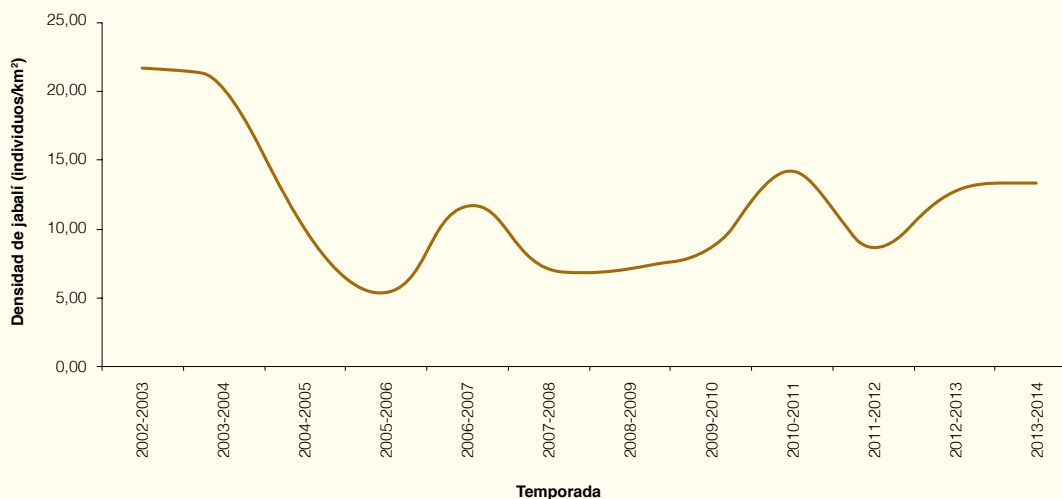
JABALÍ

La baja productividad de la población parece estar relacionada con la escasez de alimento o con enfermedades de carácter reproductivo. En

especies como el jabalí, que muestran grandes fluctuaciones poblacionales en función de los recursos alimenticios disponibles, las medidas de gestión basadas en cálculos o estimaciones medias son menos eficaces, debiéndose prever estrategias para los picos máximos y mínimos de abundancia de alimento. Se considera que la presión ejercida en los controles poblacionales y la baja tasa de crecimiento son elementos suficientes para mantener unas densidades poblacionales admisibles desde un punto de vista socioeconómico y ambiental.

La distribución heterogénea en el espacio y tiempo de los patógenos probablemente está determinada por varios factores que interactúan, como la densidad local de la población, el comportamiento de la especie, la vía de transmisión para cada patógeno, la gestión de la población y los aspectos medioambientales, incluida la climatología. Los reservorios naturales mantienen patógenos en zonas geográficamente restringidas debido a las características de los ecosistemas [26], siendo el Marquesado y Alpujarra Alta granadina donde se concentran los mayores reservorios de patógenos del jabalí en Sierra Nevada.

Figura 3



Evolución de la población de jabalí en Sierra Nevada desde la temporada cinegética 2002-2003 hasta la actualidad.



Macho de cabra montés dotado de collar emisor GPS-GSM.

5.7. Cambio en los rangos altitudinales de insectos en Sierra Nevada: evidencias del cambio climático

González-Megías, A.¹; Menéndez, R.² y Tinaut, A.¹

¹Universidad de Granada ²Lancaster University

Resumen

El cambio climático puede causar disrupciones masivas en los sistemas biológicos debido, entre otras causas, a cambios en los rangos de distribución de las especies, la fenología, las interacciones con otras especies, etc. Las zonas de montaña son excelentes escenarios para detectar estos cambios puesto que en ellas se pueden encontrar los límites inferior y superior de la distribución en muchas especies. Aquí mostramos evidencias de cambios en la distribución de tres grupos diferentes de insectos: coleópteros, lepidópteros e himenópteros. Para las especies muestreadas parece que en las dos últimas décadas ha habido un cambio altitudinal en la distribución de las especies, aumentando su distribución en el límite superior, e incluso subiendo su límite de distribución inferior.

➤ Objetivos y metodología

1. Coleópteros coprófagos

Para comprobar los cambios en la distribución de coleópteros a lo largo del tiempo se seleccionó un grupo con una amplia distribución en Sierra Nevada: los coleópteros coprófagos (Superfamilia Scarabaeoidea). Para ello se compararon los resultados obtenidos en un estudio realizado durante dos años en el pasado (1981/1982) con los obtenidos en un estudio más reciente (2006/07). En ambos períodos se muestrearon estos insectos en 18 puntos distribuidos en un gradiente altitudinal cada 100 m en altitud. Además se obtuvieron las condiciones climáticas de ambos períodos para calcular si el cambio observado en la distribución de las especies estaba relaciona-

do con los cambios esperados en el clima entre ambos períodos. Se calcularon los cambios en la media de la distribución de las especies, así como los cambios en los límites superiores e inferiores de la distribución [ver 27 para más detalle].

2. Lepidópteros e himenópteros

Para los lepidópteros se comparan datos observados por uno de los autores (AT) en la década de los 70 sobre el límite de distribución del lepidóptero *Parnassius apollo nevadensis*, así como datos documentados en la bibliografía.

Para himenópteros, se aportan datos de dos especies de hormigas: *Proformica longiseta* y

Formica fusca/lemanii. El estatus de esta especie de *Formica* no está aún bien resuelto, ya que ambas especies han sido citadas de forma equívoca debido a que los caracteres taxonómicos al uso se solapan en algunos casos [28]. Los datos históricos están basados principalmente en los publicados en un artículo [29] y en una tesis doctoral [30]. Los datos actuales derivan de diversos trabajos realizados de forma específica en el 2007 en diversos puntos previamente muestreados durante la tesis doctoral de Tinaut [30]. Otros datos derivan de prospecciones realizadas en zonas cacuminales durante los últimos 10 años, hasta el 2013 (ver Tabla 1).

Tabla 1

Localidad	Altitud (msnm)	Vertiente	1979-1981	2007-2013	Ascenso
Valle de Siete Lagunas	2.946	sur	-	<i>F. fusca/lemanii</i>	200 m
Laguna de Río Seco	3.030	sur	-	-	0 m
Laguna de Aguas Verdes	3.070	sur	-	-	0 m
Laguna Larga	2.780	norte	-	-	0 m
Ventisquero Morón	2.809	norte	-	<i>P. longiseta</i>	100 m
Laguna de la Mosca	2.910	norte	-	-	0 m
Cabecera del San Juan	2.950	norte	<i>P. longiseta</i>	<i>P. longiseta</i>	0 m
Collado Juego Bolos	3.000	norte	<i>F. fusca/lemanii</i>	<i>F. fusca/lemanii</i>	0 m
Los Panderones (Veleta)	3.050	norte	-	<i>P. longiseta</i>	100/150 m
Corral del Veleta	3.100	norte	-	-	0 m

Datos históricos y actuales de la presencia/ausencia de formícidos en zonas cacuminales de Sierra Nevada.

➤ Resultados

1. Coleópteros coprófagos

Los resultados muestran que durante el período analizado hubo cambios importantes de temperatura en las zonas bajas y medias de la montaña (subida de 1,3 °C) siendo esta subida no significativa en la parte alta de la montaña (0,8 °C). Además, se observan cambios notables en la distribución de los coleópteros coprófagos entre ambos periodos. En concreto se comprueba que la altitud media a la que se encuentran estas especies se incrementa para la mayoría de las especies (89% de las especies; Figura 1). Curiosamente, estos cambios estuvieron relacionados sobre todo con cambios en los límites inferiores, pero no de forma significativa con los límites superiores de la distribución.

Estos cambios en la altitud media sufridos por las especies fueron ligeramente superiores a los cambios predichos al observar los cambios en las temperaturas entre los dos periodos (Figura 2). Sin embargo, estas diferencias no fueron significativas, indicando que las especies realmente han seguido los cambios en el clima.

Casi todas las especies de escarabajos coprófagos encontradas en ambos periodos aumentaron su límite de distribución superior (17 de 19 especies). Los cambios observados en el rango superior de la distribución estuvieron negativamente correlacionados con la altitud media de las especies durante el periodo histórico (Figura 2). Los límites de distribución inferior también cambiaron en la mayoría de las especies hacia arriba (16 de las especies) y sólo en 3 especies el límite inferior de la distribución disminuyó. En ambos casos, las contracciones en el límite inferior y las incrementos de altitud en el límite superior coincidieron con los valores predichos por los cambios observados en temperatura.

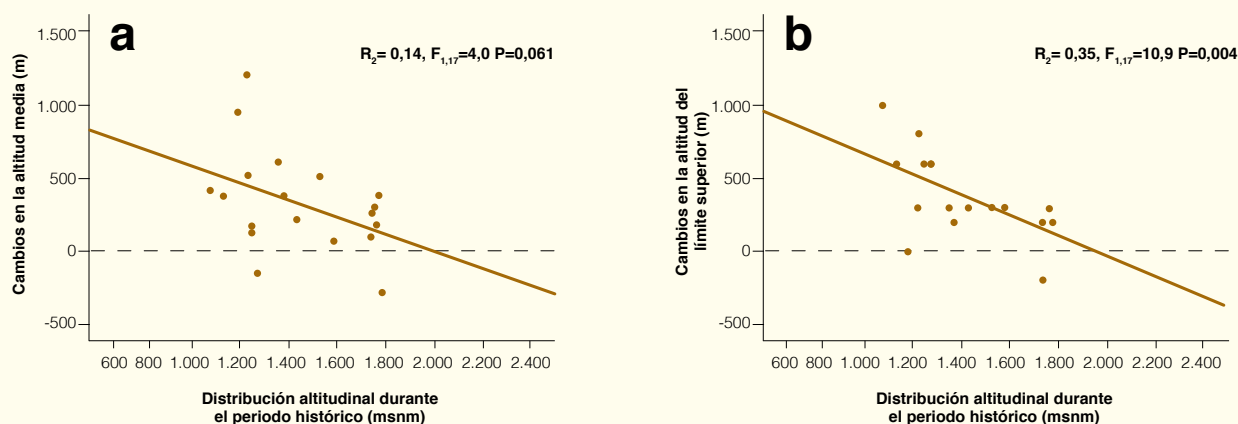
2. Lepidópteros e himenópteros

Los datos históricos para *Parnassius apollo nevadensis* muestran que esta especie en 1971 (24-julio) era muy abundante en el acceso al Puerto de la Ragua, a los lados de la carretera, unos 2 km antes de alcanzar dicho Puerto (1.950 msnm). Sabariego de la Plaza y Aragón de Inés [31] señalan el Puerto de San Juan (2.500 msnm) como la máxima altitud de esta

especie. En la actualidad esta especie tiene su máximo poblacional a unos 2.300 msnm en la vertiente norte y unos 2.600 m en la sur. Algunos ejemplares pueden verse volando a unos 3.000 msnm de altitud en la vertiente sur, si bien no tenemos evidencias de que se reproduzcan a estas altitudes pues no hemos buscado sus larvas, aunque la planta hospedadora sí que habita en estas altitudes. El límite altitudinal inferior lo podemos situar hacia los 1.850 msnm en la ladera norte y a unos 2.200 msnm en la sur. Estos datos indicarían una subida del límite superior de la especie de unos 400 m.

Con respecto a los formícidos, los datos históricos muestran que *Proformica longiseta* y *Formica fusca/lemanii* son las dos especies de formícidos que más ascienden en altitud. El resto de formícidos suelen aparecer unos 300 ó 400 msnm por debajo de ellas. La altitud que estas especies pueden alcanzar en el macizo de Sierra Nevada es variable en función de la vertiente y de los microclimas. En general los datos históricos situaban el límite altitudinal de *Formica fusca/lemanii* en unos 2.900 m,

Figura 1



Relación de los cambios observados entre los dos periodos de estudio en a) la altitud media y b) el límite superior de especies de coprófagos con respecto a la media de la distribución de las especies durante el periodo histórico.

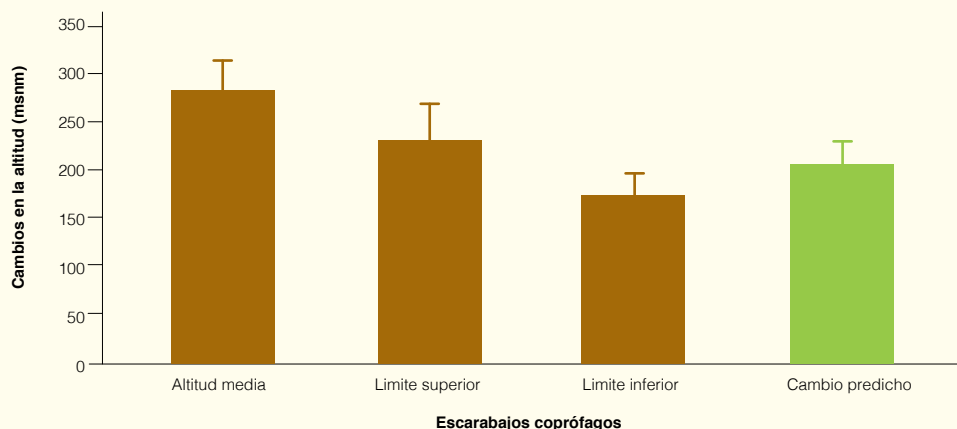
en la cabecera del Valle del San Juan, ligada a los bordes de los borreguiles [29], y en algunas localidades aisladas en la Laguna de La Caldera y en el Collado de Juego de Bolos, a unos 3.000 msnm y ya conocidas desde 1978 [30]. Los datos históricos situaban a *Proformica longiseta*, más xerófila que la anterior, hasta los 2.950 msnm. Aunque los datos de la ladera sur no son tan concretos, permiten delimitar de forma precisa el límite altitudinal poblacional por debajo de los 2.950 msnm de

altitud. Queremos señalar que históricamente existía dos poblaciones aisladas de esta especie en la ladera oeste del Puntal de Juego de Bolos (3.050 msnm) y en las inmediaciones de la Laguna de La Caldera (3.060 msnm). Ambas poblaciones mantienen su tamaño y su aislamiento en la actualidad.

Los datos actuales muestran poblaciones de *Formica fusca/lemanii* hasta los 3.100 msnm de altitud. Para *Proformica longiseta* se ha

encontrado una población a unos 3.140 msnm. Por tanto, ambas especies han colonizado en los últimos 30 años algunos puntos que permanecían deshabitados a finales de los años 70, aunque esta colonización no es uniforme (Tabla 1). En conclusión, podemos detectar en general una subida altitudinal, que llega a ser de unos 200 m de altitud en la vertiente sur.

Figura 2



Media de los cambios observados en la altitud media, el límite superior y el límite inferior de las especies coprófagos junto con los cambios predichos según el clima. Las diferencias no fueron significativas para ninguna de las altitudes con el cambio predicho.

➤ Discusión y conclusiones

En Sierra Nevada se observa un desplazamiento altitudinal en la distribución de las especies de insectos analizadas, lo que se manifiesta en ascensos altitudinales en los límites superiores e inferiores de la distribución. Durante este período de cambio se ha observado también un aumento de la temperatura, sobre todo en las zonas bajas y medias de la montaña. Por tanto, parece altamente probable

sugerir que esta respuesta de las especies de insectos terrestres ha sido ocasionada, al menos parcialmente, por el calentamiento global, colonizando nuevas áreas de la alta montaña que ahora son climáticamente adecuadas.

Esta respuesta es consistente con la observada en otras regiones para diferentes grupos de organismos, desde plantas hasta mamíferos.

La tolerancia a los incrementos en temperatura también parece ser la causa de la subida en el límite de distribución sur de las especies aunque otros factores como alteraciones en el hábitat o disponibilidad de recursos no pueden ser descartados.

Bibliografía

› Más referencias en http://refbase.iecolab.es/ref_dossier_resultados.html

5.1. Comunidades vegetales de alta montaña: GLORIA

- [1] Sánchez-Rojas, C.P. 2012. *Comunidades vegetales de alta montaña: Proyecto GLORIA*. Pp.: 70-71. En: Aspizua, R., Barea-Azcón, J.M., Bonet, F.J., Pérez-Luque, A.J. y Zamora, R. (Eds.). *Observatorio de Cambio Global Sierra Nevada: metodologías de seguimiento*. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía.
- [2] Fernández-Calzado, M.R.; Molero-Mesa, J.; Merzouki, A. & Casares-Porcel, M. (2012). Vascular plant diversity and climate change in the upper zone of Sierra Nevada, Spain. *Plant Biosystem*, 146(4): 1044-1053.
- [3] Pauli, H.; Gottfried, M.; Dullinger, S.; Abdaladze, O.; Akhalkatsi, M.; Alonso, J.L.B.; Coldea, G.; Dick, J.; Erschbamer, B.; Calzado, R.F.; Ghosn, D.; Holten, J.I.; Kanka, R.; Kazakis, G.; Kollár, J.; Larsson, P.; Moiseev, P.; Moiseev, D.; Molau, U.; Mesa, J.M.; Nagy, L.; Pelino, G.; Puscas, M.; Rossi, G.; Stanisci, A.; Syverhuset, A.O.; Theurillat, J.P.; Tomaselli, M.; Unterlugauer, P.; Villar, L.; Vittoz, P. & Grabherr, G. (2012). Recent plant diversity changes on Europe's mountain summits. *Science*, 336: 353-355.
- [4] Gottfried, M.; Pauli, H.; Futschik, A.; Akhalkatsi, M.; Barancok, P.; Benito Alonso, J.L.; Coldea, G.; Dick, J.; Erschbamer, B.; Fernandez Calzado, M.; Kazakis, G.; Krajci, J.; Larsson, P.; Mallaun, M.; Michelsen, O.; Moiseev, D.; Moiseev, P.; Molau, U.; Merzouki, A.; Nagy, L.; Nakhutsrishvili, G.; Pedersen, B.; Pelino, G.; Puscas, M.; Rossi, G.; Stanisci, A.; Theurillat, J.P.; Tomaselli, M.; Villar, L.; Vittoz, P.; Vogiatzakis, I. & Grabherr, G. (2012). Continent-wide response of mountain vegetation to climate change. *Nature Climate Change*, 2 (2): 111-115.

5.2. Tendencia de la flora de Sierra Nevada

- [5] Blanca, G.; Cabezudo, B.; Cueto, M.; Fernández López, C. & Morales Torres, C. (Eds.) (2009). *Flora Vascular de Andalucía Oriental*. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, Sevilla.
- [6] Stubben, C.J. & Milligan, B. (2007). Estimating and analyzing demographic models using the popbio package in R. *Journal of Statistical Software*, 22 (11): 1-23.
- [7] Blanca, G. (coord.). (2007). *Consultoría y asistencia técnica para la realización de un estudio genético de algunas especies vegetales en peligro crítico de las Sierras Orientales de Andalucía*. Memoria final.

- [8] Kéry, M.; Matthies, D. & Spillmann, H.H. (2000). Reduced fecundity and offspring performance in small populations of the declining grassland plants *Primula veris* and *Gentiana lutea*. *Journal of Ecology*, 88 (1): 17-30.
- [9] Blanca, G.; López Onieva, M.R.; Lorite, J.; Martínez Lirola, M.J.; Molero Mesa, J.; Quintas, S.; Ruíz Girela, M.; Varo, M.A. & Vidal, S. (2001). *Flora amenazada y endémica de Sierra Nevada*. Editorial Universidad de Granada. Granada.

5.3. Anfibios y cambio global en Sierra Nevada

- [10] González-Miras, E.; García-Cardenete, L. & Tejedo, M. (2012). Historia natural. Pp.: 17-22. En: Seguimiento *Alytes dickhilleni*. Informe final. Monografías SARE, 02. Asociación Herpetológica Española. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid.
- [11] Zacharias, I. & Zamparas, M. (2010). Mediterranean temporary ponds. A disappearing ecosystem. *Biodiversity and Conservation*, 19 (14): 3827-3834.
- [12] Araújo, M.B.; Thuiller, W. & Pearson, R.G. (2006). Climate warming and the decline of amphibians and reptiles in Europe. *Journal of Biogeography*, 33: 1712-1728.

5.4. Cambios en las comunidades de aves de Sierra Nevada

- [13] Zamora, R. & Barea-Azcón, J. M. (2015). Long-term changes in mountain passerine birds communities in Sierra Nevada (Southern Spain): a 30 year case study. *Ardeola*, 62(1): 3-18.
- [14] Zamora, R. & Camacho, I. (1984). Evolución estacional de la comunidad de aves en un robledal de Sierra Nevada. *Doñana, Acta Vertebrata*, 11 (2): 129-150.
- [15] Zamora, R. (1987). Variaciones altitudinales en la composición de las comunidades nidificantes de aves de Sierra Nevada (Sur de España). *Doñana, Acta Vertebrata*, 14: 83-106.
- [16] Zamora, R. (1988). Composición y estructura de las comunidades de passeriformes de alta montaña de Sierra Nevada. *Ardeola*, 35 (2): 197-220.
- [17] Zamora, R. (1990). Seasonal variations of a passerine community in a mediterranean high mountain. *Ardeola*, 37 (2): 219-228.

5.5. Tendencia de las poblaciones de aves rapaces rupícolas en Sierra Nevada

- [18] Del Moral JC. (Ed.). (2009). *El águila real en España. Población reproductora en 2008 y método de censo*. SEO/BirdLife. Madrid.
- [19] Del Moral JC. (Ed.). (2006). *El águila perdicera en España. Población en 2005 y método de censo*. SEO/BirdLife. Madrid.
- [20] Del Moral JC. & Molina, B. (Eds.). (2009). *El halcón peregrino en España. Población reproductora en 2008 y método de censo*. SEO/BirdLife. Madrid.
- [21] Muñoz, A.R.; Márquez, A.L. & Real, R. (2013). Updating known distribution models for forecasting climate change impact on endangered species. *PLoS ONE*, 8 (6): 1–9.
- [22] Gil-Sánchez, J.M.; Moleón, M.; Otero, M. & Bautista, J. (2004). A nine-year study of successful breeding in a Bonelli's eagle population in southeast Spain: a basis for conservation. *Biological Conservation*, 118 (5): 685–694.

5.6. Demografía de poblaciones de ungulados e incidencia de enfermedades emergentes

- [23] Alasaad, S.; Granados, J.E.; Fandos, P.; Cano-Manuel, F.-J.; Soriguer, R.C. & Pérez, J.M. (2013). The use of radio-collars for monitoring wildlife diseases: a case study from Iberian ibex affected by *Sarcoptes scabiei* in Sierra Nevada, Spain. *Parasites & Vectors*, 6 (1): 1–5.
- [24] Cano-Manuel, F.J. (2014). *Aspectos relevantes de la ecología del jabalí (Sus scrofa L., 1758) en Sierra Nevada*. Tesis Doctoral. Universidad de Jaén.

- [25] Cano-Manuel, F.J.; López-Olvera, J.; Fandos, P.; Soriguer, R.C.; Pérez, J.M. & Granados, J.E. (2014). Long-term monitoring of 10 selected pathogens in wild boar (*Sus scrofa*) in Sierra Nevada National Park, southern Spain. *Veterinary Microbiology*, 174 (1-2): 148–154.
- [26] Fulford, G.R.; Roberts, M.G. & Heesterbeek, J.A.P. (2002). The meta-population dynamics of an infectious disease: tuberculosis in possums. *Theoretical Population Biology*, 61 (1): 15–29.

5.7. Cambio en los rangos altitudinales de insectos en sierra nevada: evidencias del cambio climático

- [27] Menéndez, R.; González-Megías, A.; Jay-Robert, P. & Marquéz-Ferrando, R. (2014). Climate change and elevational range shifts: evidence from dung beetles in two European mountain ranges. *Global Ecology and Biogeography*, 23 (6): 646–657.
- [28] Seppä, P.; Helanterä, H.; Trontti, K.; Punttila, P.; Cherneko, P.; Martín, S.J. & Sundström, L. (2011) The many ways to delimit species: hairs, genes and surface chemistry. *Myrmecological News*, 15: 31-41.
- [29] Tinaut, A. (1979). Estudio de la mirmecofauna de los borreguiles del San Juan (Sierra Nevada, Granada) (Hym. Formicidae). *Boletín de la Asociación Española de Entomología*, 3: 173–183.
- [30] Tinaut, A. (1981). *Estudio de los formícidos de Sierra Nevada*. Tesis doctoral. Universidad de Granada.
- [31] Sabariego, E. & Aragones, J. (1978). *Los Papilionidae de España*. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, Madrid.

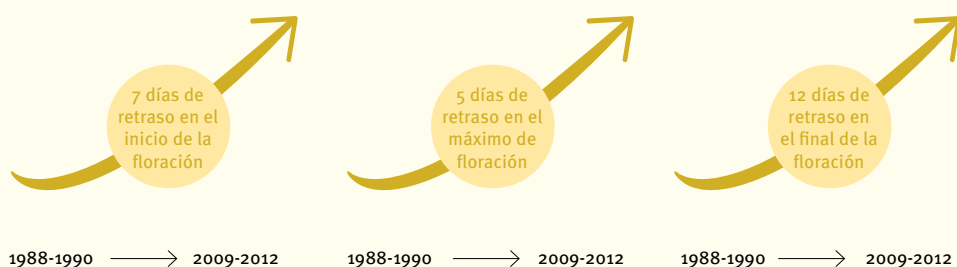


Fenología

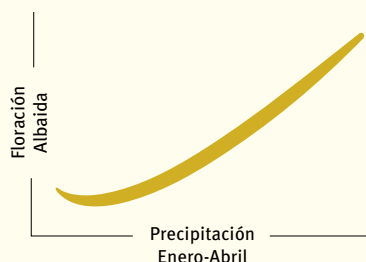
Las alteraciones fenológicas constituyen una de las evidencias más claras de los efectos del cambio climático sobre los ciclos vitales de los organismos. Buenos ejemplos son los cambios en las fechas de reproducción de aves y anfibios, de migración de las aves, de emergencia de las fases adultas de insectos, o del crecimiento, floración y fructificación de las plantas. Los gradientes altitudinales de las montañas ofrecen buenas oportunidades para analizar la repercusión de las modificaciones en el clima sobre los procesos fenológicos. Estas respuestas

toman especial fortaleza cuando se dispone de amplias series temporales de datos fenológicos. En Sierra Nevada existen datos fenológicos sobre la floración de la vegetación de los borreguiles. Al analizar los cambios acaecidos en un lapso de tiempo de 25 años (1988-90 y 2009-12) se ha constatado un claro patrón de retraso en la floración para las especies estudiadas. Este retraso es especialmente evidente en el caso de los taxones de floración temprana. La respuesta observada coincide con un calentamiento del clima en Sierra Nevada (ver capítulo 1) y contradice

el patrón que cabría esperar, que por lo general suele mostrar adelantos fenológicos asociados al calentamiento del clima. En este caso, la estrecha dependencia de estos humedales de alta montaña con la disponibilidad hídrica podría ser la principal explicación a esta respuesta. En el caso de otras especies vegetales asociadas a ambientes situados en cotas medias y bajas de Sierra Nevada, la respuesta parece muy variable entre años y especies. Las especies de floración temprana responden adelantando su floración en años inusualmente cálidos, mientras que las



Vegetación de Borreguiles



Floración a lo largo de gradientes altitudinales



Mariposas diurnas

Resumen gráfico de los principales resultados descritos en el presente capítulo. Se muestran tendencias temporales en diferentes atributos de la fenología de floración de especies propias de borreguiles (gráficas con flechas) y relaciones entre variables (gráficas con ejes) relacionadas con la fenología de floración de determinadas especies y la fenología de vuelo de mariposas diurnas.

especies de floración más tardía no responden de forma tan nítida, mostrando una estrecha relación con otros factores, como la precipitación. De hecho, especies como la albaida responden con rapidez a la escasez de precipitaciones, adelantando la floración.

El estudio de la comunidad de mariposas diurnas muestra que el patrón más frecuente consiste en un retraso fenológico de la fecha

de vuelo conforme ascendemos en altitud. Las especies más sensibles a los efectos impuestos por la altitud son las especies más precoces (especies de primavera). Las primaveras cálidas provocan una menor diferencia entre cotas en la fenología de vuelo de las cinco especies de las que se dispone de una serie de datos más completa. En otras palabras, un calentamiento de la primavera conlleva que las zonas altas y bajas se asemejen más desde el punto de vista fenológico.

co. Además, en el caso concreto de la mariposa apolo, una especie icónica de la biodiversidad alpina de Sierra Nevada, se ha constatado que las primaveras calurosas (principalmente el mes de mayo) provocan un adelanto en el periodo de vuelo de los adultos, al menos durante los últimos 7 años.

6.1. Cambios temporales en la diversidad, abundancia y fenología de las comunidades vegetales: un estudio de 25 años en los borreguiles

Pérez-Luque, A.J.¹; Sánchez-Rojas, C.P.²; Zamora, R.¹ y Bonet, F.J.¹
¹ Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía, Universidad de Granada ² Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía

Resumen

Los borreguiles son ecosistemas muy sensibles a los cambios en la disponibilidad hídrica y la temperatura, convirtiéndose en comunidades ideales para el estudio del cambio climático. Un análisis diacrónico de 25 años ha revelado que estas comunidades no presentan cambios significativos en la composición ni en la abundancia de especies. Sin embargo, los atributos fenológicos sí difieren a nivel de comunidad entre los dos periodos analizados. En general se observa un retraso en la floración para las especies de desarrollo más temprano, que parecen ser las más sensibles.

➤ Objetivos y metodología

➤ Resultados

Se han analizado los cambios en la composición, abundancia y fenología de floración de las comunidades de plantas de los borreguiles, en dos periodos temporales diferentes: 1988-1990 y 2009-2012. Para ello se muestrearon parcelas permanentes de 1 x 1 m, distribuidas al azar en las comunidades de borreguiles de cota media (borreguil de San Juan) [1, 2]. Las parcelas se visitaron quincenalmente (desde mayo hasta octubre). Para cada especie se anotó la presencia/ausencia, cobertura y el número de estructuras florales. Con estos datos se construyeron perfiles de floración y se obtuvieron diferentes indicadores fenológicos: inicio y fin de floración, duración de la floración y fecha de máxima floración. Posteriormente se analizaron cambios en la abundancia de floración (cantidad de flores) y fenología de floración a nivel de comunidad, diferenciando entre especies de floración temprana, tardía y media. Estas comparaciones se han realizado para 19 taxones.

A nivel de comunidad no se han detectado diferencias significativas entre ambos periodos para la composición de especies. En el periodo 1988-1990 el número de taxones fue de 23 frente a los 32 que se han identificado en la actualidad, con 20 taxones detectados en ambos periodos. La abundancia de floración no ha sufrido cambios significativos entre los dos periodos a nivel de comunidad. Tampoco se observan cambios en la abundancia de floración para las especies de floración temprana y media. Únicamente se encontraron cambios significativos en la abundancia de floración para dos especies tardías del género *Trifolium* (*Trifolium pratense* y *Trifolium repens*). Por el contrario, sí se han

encontrado cambios significativos para los atributos de floración. A nivel de comunidad se observan diferencias significativas para todos los atributos de floración entre los dos periodos analizados (Tabla 1, Figura 1). Los resultados muestran un retraso medio de 7 días para el inicio de floración y de 12 días para el final de la floración. El periodo de máxima floración se ha retrasado una media de 5 días. Las especies de floración tardía no presentan cambios en sus atributos fenológicos entre los dos periodos comparados, mientras que las especies de floración temprana muestran cambios significativos en el inicio y fin de la floración, así como en la fecha de máxima floración (Figura 2).

Tabla 1

	p-valor	Periodo	Media ± SD
Inicio Floración	0,0001	1990 2010	169,52 ± 3,30 176,98 ± 2,78
Fin Floración	0,0003	1990 2010	199,72 ± 4,63 212,30 ± 3,74
Periodo	0,0312	1990 2010	30,20 ± 2,32 35,33 ± 2,50
Día de máxima floración	0,0190	1990 2010	181,20 ± 3,91 186,16 ± 3,14

Valores promedios para diferentes atributos de floración en los periodos 1988-1990 (1990) y 2009-2012 (2010). Se muestran valores del día juliano (promedio y desviación estándar) para todas las variables excepto para el periodo, que se muestra la duración en días (promedio y desviación estándar).

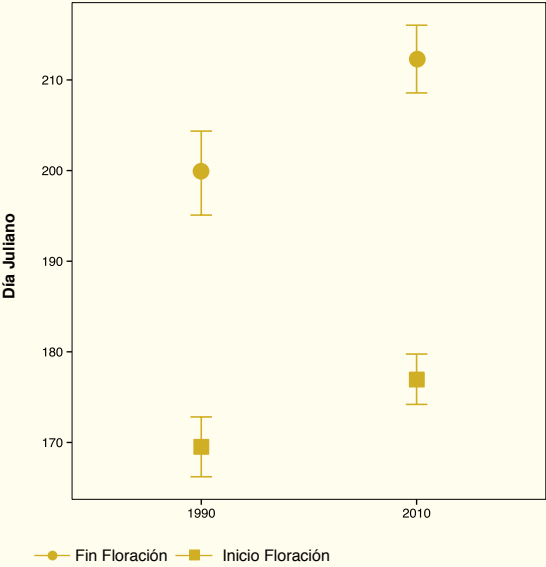
> **Discusión y conclusiones**

La diversidad taxonómica encontrada en los borreguiles es muy alta, tanto a nivel de especies como de géneros y familias, al igual que ocurre en las zonas altas de Sierra Nevada [3]. Nuestros resultados muestran que no existen cambios significativos en la diversidad vegetal

ni en la abundancia de flores en los borreguiles durante los últimos 25 años. La estricta vinculación de los borreguiles con zonas que permanecen húmedas durante todo el verano en la alta montaña puede condicionar la estabilidad del sistema observado. Sin embargo la fenología de

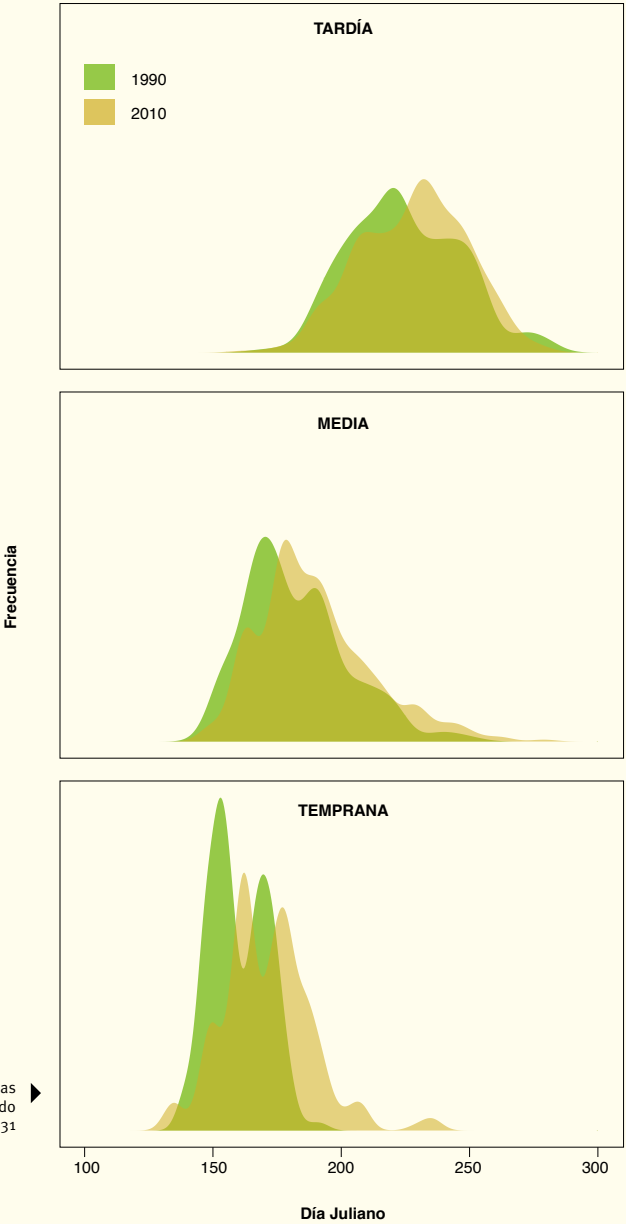
floración sí ha sufrido cambios entre estos dos periodos, aunque de forma diferencial. Se observa un retraso general para todos los atributos fenológicos analizados, retraso que es estadísticamente significativo en el caso de las especies de floración más temprana.

Figura 1



Día de inicio (cuadrado) y fin de la floración (círculo) a nivel de comunidad entre el periodo 1988-1990 (1990) y 2009-2012 (2010). La fecha se indica en días julianos (1 de enero: día 1; 31 de diciembre: día 365).

Figura 2



Perfiles de floración del periodo 1988-1990 (1990; verde) y 2009-2012 (2010; marrón) para las especies de floración temprana (inferior), media (centro) y tardía (superior) entre el periodo 1988-1990 (1990) y 2009-2012 (2010). La fecha se indica en días julianos (1 de enero: día 1; 31 de diciembre: día 365).



6.2. Cambios en la floración a lo largo de gradientes ambientales

Muñoz, J.M.

Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía

Resumen

Se exponen los resultados de la fenología de floración de 13 especies vegetales registrados en 5 localidades diferentes de Sierra Nevada. En estos cinco años se registró un adelanto generalizado y significativo de la floración en 2011, lo cual se relaciona con un aumento de la temperatura en los primeros meses de ese año. La respuesta observada difiere entre especies y entre años. La rascavieja (*Adenocarpus decorticans*) es la especie que mayor amplitud fenológica presenta. La albaida (*Anthyllis citisoides*) muestra una sensibilidad especial frente a la precipitación en invierno, mientras que el piorno (*Genista versicolor*) apenas muestra diferencias entre años.

➤ Objetivos y metodología

El objetivo del presente seguimiento es conocer las tendencias fenológicas de la floración de algunas especies abundantes y ampliamente distribuidas en Sierra Nevada. Se seleccionó un grupo de especies en los diferentes pisos de vegetación de Sierra Nevada, cuyo comportamiento fenológico fue durante 5 años en 4 parcelas fijas situadas a lo largo de un gradiente altitudinal. En cada muestra se ha registrado el proceso

de floración de cada individuo por asignación de unos niveles definidos (-: sin floración, 0: con estructuras florales; 1: hasta 5 flores; 2: más de 5 flores; 3: máximo de floración; 4: flores y frutos y 5: fructificación plena). El número de visitas a cada parcela varió entre 5 y 9 en cada año (media: 7). Mediante regresión se ha calculado una aproximación al día de máxima floración (en adelante DMF). La desviación anual del

DMF con respecto al valor medio de la serie fue empleada como parámetro de referencia para establecer comparativas interanuales.

Los resultados se comparan con los datos de temperatura y precipitación, entre enero y abril, registrados por 6 estaciones meteorológicas representativas del área de estudio (de 600 a 2.150 msnm).

➤ Resultados

En Sierra Nevada no se ha detectado aún una tendencia clara en la fenología de la floración de las especies estudiadas, probablemente debido a que se necesita una serie temporal más extensa para explorar el papel de las variaciones en la temperatura y la precipitación como variables predictivas clave. Sin embargo, la intensidad del muestreo realizado permite establecer relaciones entre el comportamiento fenológico de las especies estudiadas y las características climáticas del año (temperatura y precipitación), así como comprender la influencia de la altitud sobre la fenología de floración de estas especies.

Temperatura

Se produce un adelanto de la floración en el año 2011, en el que se registraron temperaturas más elevadas durante los cuatro primeros meses del año (enero-abril) en comparación con el resto de la serie (Figura 1).

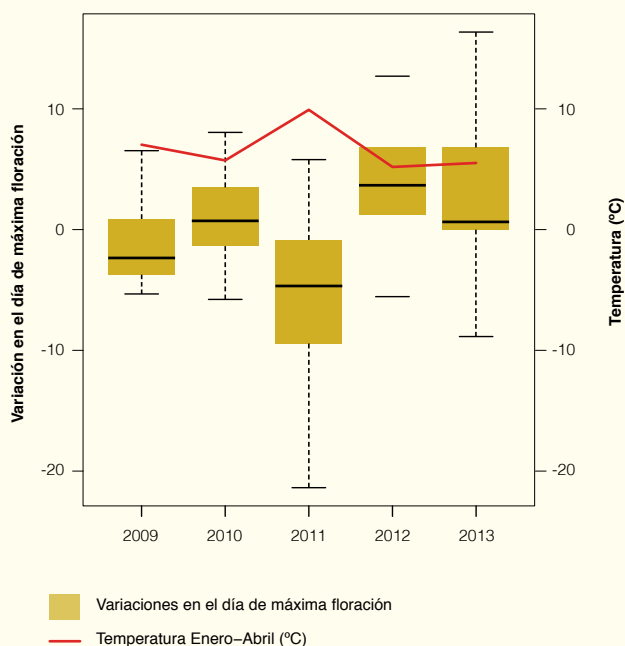
La respuesta al incremento de temperatura es diferente entre especies [4]. Las especies de floración temprana (*Prunus dulcis*, *P. avium*, *Adenocarpus decorticans*, *Cytisus oromediterraneus*) mostraron mayores adelantos en la floración en 2011, mientras que las especies de floración tardía (*Anthyllis cytisoides*, *Genista*

umbellata, *G. versicolor* y *Retama sphaerocarpa*) no presentaron ese comportamiento.

Precipitación

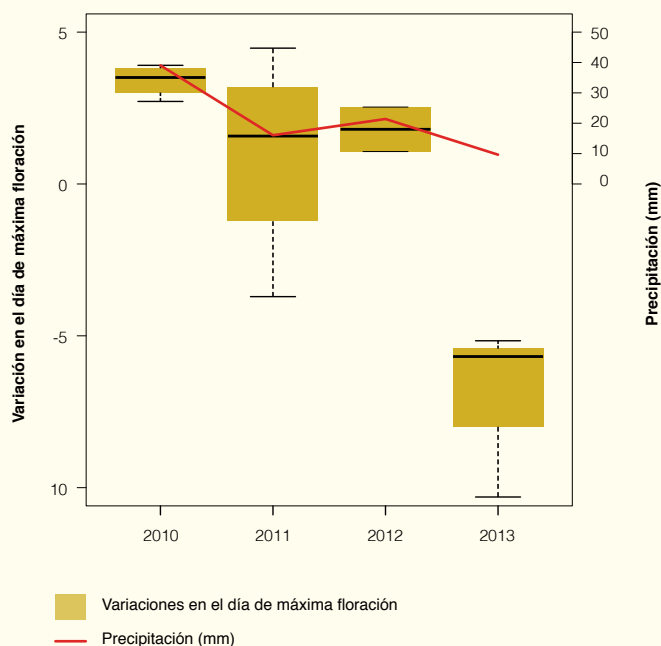
En el sureste de Sierra Nevada las escasas precipitaciones condicionan notablemente la fenología de floración. La albaida florece antes en estas zonas durante los años en los que llueve poco entre enero y abril (Figura 2). En los comienzos de años poco lluviosos solamente florecen los individuos de las cotas superiores, aunque abortan todas las flores y detienen el proceso en las primeras fases.

Figura 1



Relación entre la variación anual de DFM de las especies estudiadas y la temperatura media (línea roja).

Figura 2



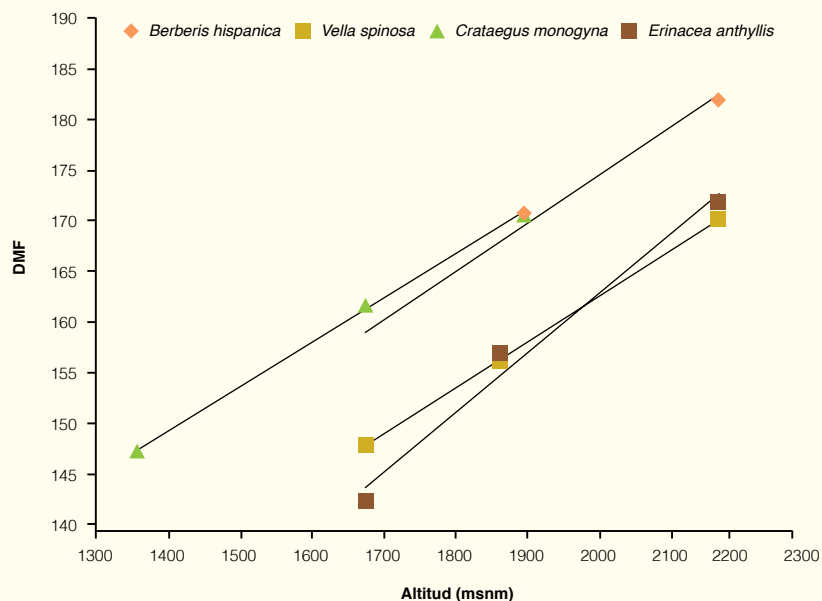
Relación entre la variación anual de DMF de albarda y la precipitación acumulada durante los meses de enero y abril (línea roja).

Altitud

El retraso altitudinal varía para cada especie. La tasa de cambio no es homogénea y con frecuencia se han registrado retrasos de diferente magnitud entre localidades situadas a la misma altitud pero en donde se perciben diferencias en el hábitat. Durante 2013 se hizo un seguimiento evitando diferencias en el hábitat, observándose una relación proporcional directa entre el DMF y la altitud.

Se ha registrado un retraso altitudinal de 56,3 días/Km para *Erinacea anthyllis* ($r_s = 0,98$, $p = 0,080$), de 45,6 días/Km para *Berberis hispanica* ($r_s = 0,99$, $p = 0,060$), 41,8 días/Km para *Crataegus monogyna* ($r_s = 0,99$, $p = 0,023$) y de 43,3 días/Km para *Vella spinosa* ($r_s = 0,99$, $p = 0,009$) (Figura 3).

Figura 3



Fecha de máxima floración en un gradiente altitudinal de *V. spinosa*, *C. monogyna*, *E. anthyllis* y *B. hispanica* en 2013.



> Discusión y conclusiones

La respuesta de la fenología de las distintas especies a variables biofísicas fue heterogénea. De los cinco años en los que se ha seguido la floración en Sierra Nevada, el año 2011 registró temperaturas más cálidas en los cuatro primeros meses del año. El esperado adelanto de la floración se acentuó en las especies de floración

más temprana y apenas influyó en la floración de las especies más tardías. Otros factores, además de la temperatura, como la precipitación y la altitud, tienen una gran influencia sobre el desarrollo de la floración. Las escasas precipitaciones de los últimos años han provocado una disminución drástica del número de flores y el

adelanto fenológico de la albaida, una especie clave en el paisaje del sector oriental de Sierra Nevada. Estos resultados han permitido aumentar el conocimiento de las variables ambientales que condicionan la fenología en diversas especies de flora de Sierra Nevada.



Matorral oromediterráneo en el que destaca *Genista versicolor* en plena floración.

6.3. Fenología de mariposas diurnas en Sierra Nevada

Barea-Azcón, J.M.

Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía

Resumen

El estudio fenológico de las comunidades de mariposas diurnas de Sierra Nevada muestra que la mayor parte de las especies atrasan sus periodos de vuelo en las localidades situadas a mayor altitud. Las especies con periodos de vuelo más tardíos (especies de verano) muestran una sincronización mayor a lo largo de sus distribuciones altitudinales que las especies más precoces (especies de primavera). Se ha comprobado que la ocurrencia de primaveras cálidas reduce el retardo altitudinal medio de cinco especies de mariposas representativas de diferentes ecosistemas de Sierra Nevada. Esto sugiere que un incremento de la temperatura reducirá las diferencias fenológicas a lo largo del gradiente altitudinal estudiado. Los resultados obtenidos muestran que las primaveras cálidas, y más concretamente las temperaturas altas del mes de mayo, provocan un adelanto del periodo de vuelo de la mariposa apolo de Sierra Nevada.

➤ Objetivos y metodología

Censos de mariposas

El método de muestreo consistió en el recuento visual de individuos adultos de mariposas diurnas a lo largo de transectos a pie, donde se contabilizan todas las mariposas que se observan en una caja imaginaria de 2,5 m a cada lado y de 5 m por delante y por encima del observador [5]. Es un método aceptado internacionalmente y se sigue en otros programas similares en diferentes lugares del mundo. El número anual de transectos varió según el año entre 8 y 22 y la longitud de los mismos entre 300 y 3.272 m (media: 1.589,5 m). Los transectos se repitieron un mínimo de dos veces al mes y un máximo de una vez por semana. Los muestreos se realizaron desde los 700 a los 3.100 msnm.

Fenología de las mariposas

Para cada año y para cada especie se calculó la fecha media de vuelo como: $(\sum n^{\circ} \text{ de mariposas de una especie determinada} \times \text{fecha en la que se realiza el transecto}) / n^{\circ} \text{ total de mariposas de esa especie contabilizados en ese año y en esa localidad}$ [6]. No se han tenido en cuenta las especies que no son univoltinas en el área de estudio, las especies que presentan dificultades

para su identificación en campo, que presentan adultos invernantes, especies migradoras o especies de hábitos marcadamente arborícolas. A partir de esta información y de su regresión frente a la altitud a la que se sitúa cada una de las localidades estudiadas se ha inferido el retraso fenológico (expresado como días/km).

Datos climáticos

Para contrastar los efectos de la temperatura sobre el retraso fenológico, se utilizaron datos procedentes de la red de estaciones multiparamétricas del Observatorio del Cambio Global en Sierra Nevada. Se utilizaron datos de las estaciones del Encinar (1.700 msnm), Rambla de Guadix (600 msnm), Embarcadero (1.550 msnm), Piedra de los Soldados (2.150 msnm) y Aljibe de Montenegro (975 msnm).

Para analizar los efectos de la climatología sobre la fenología de *Parnassius apollo* se realizó una regresión múltiple donde la variable dependiente fue la fecha media de vuelo de los adultos en la Laguna Seca y los predictores fueron las temperaturas medias y la precipitación acumulada de abril a junio (valores mensuales y promedio para los tres meses) registrados en

la estación meteorológica ubicada en un punto intermedio del transecto (2.280 msnm).



Blanca del majuelo (*Aporia crataegi*).

➤ Resultados

Gradiente altitudinal

En los análisis han sido consideradas entre 6 y 14 especies/año, de acuerdo a los criterios establecidos. Solamente 6 especies fueron analizadas a lo largo de los tres años estudiados. La proporción de especies que muestran un retraso o un adelanto altitudinal significativo fue del 83,3 % en 2012, del 71,4 % en 2013 y del 83,3 % en 2014. En el año 2012 cinco de las seis especies retrasaron su fenología en un gradiente altitudinal, todas ellas con una respuesta significativa. En 2013, 9 especies mostraron un retraso fenológico significativo en el citado gradiente altitudinal, y 5 mostraron adelanto fenológico significativo en relación con la altitud. Por último, en 2014, 10 especies mostraron un retraso en su periodo de vuelo en relación a la altitud y 2 mostraron el patrón inverso, en todos los casos esta respuesta fue significativa. Una pauta común a todos los años es el hecho de que las especies que muestran mayor atraso fenológico son aquellas cuyo periodo de vuelo es más temprano (Figura 1).

Al estudiar la fenología de las cinco especies de mariposas diurnas con una respuesta fenológica altitudinal significativa durante los tres años analizados se observaron fluctuaciones interanuales en los valores medios (2012: 24,2 días de retraso/km de ascensión, 2013: 29,2 días de retraso/km de ascensión y 2014: 27,4 días de retraso/km de ascensión). Estas oscilaciones están relacionadas con la temperatura media de los meses de marzo, abril, mayo y junio ($r_s = 0,99$; p-valor $< 0,001$, Figura 2). Las especies incluidas en este análisis muestran perfiles ecológicos diferentes, aunque todas ellas son elementos de carácter montano: *Aporia crataegi* (altitud media 2012-2014: 1.746 msnm), *Melanargia lachesis* (altitud media 2012-2014: 1.804 msnm), *Hyponphele lycaon* (altitud media 2012-2014: 2.055 msnm), *Lycaena alci-prhon* (altitud media 2012-2014: 2.055 msnm) y *Parnassius apollo* (altitud media 2012-2014: 2.336 msnm).

Un caso concreto: la mariposa Apolo de Sierra Nevada

Los resultados obtenidos analizando una serie temporal de 6 años de datos disponibles para *Parnassius apollo nevadensis* muestran que la fecha media de vuelo está sujeta a fluctuaciones interanuales, pero que las diferencias entre localidades situadas a diferente altitud se mantienen constantes entre años (Figura 3). La temperatura media del mes de mayo condiciona el adelanto o el atraso del vuelo de la mariposa apolo en la localidad en la que existe una serie de datos más completa, situada en la Laguna Seca ($r_s = 0,95$; p-valor $< 0,001$, Figuras 4 y 5). De este modo, temperaturas más cálidas durante el mes de mayo propiciarían el adelanto fenológico de los adultos de apolo de Laguna Seca, mientras que temperaturas más frías en el mismo mes favorecerían un atraso. El retardo altitudinal medio para las diferentes poblaciones estudiadas de la mariposa apolo de Sierra Nevada durante los últimos 3 años es de 45,2 días/km.

➤ Discusión y conclusiones

Gradientes altitudinales en la fenología de las mariposas diurnas de Sierra Nevada

El seguimiento de mariposas diurnas en Sierra Nevada durante los últimos tres años muestra como la mayor parte de las especies retrasan su periodo de vuelo en cotas altas, aunque esta respuesta no es constante ni entre especies ni entre años. Los resultados obtenidos muestran un atraso medio de 26,93 días/km para cinco especies de mariposas diurnas con perfiles ecológicos diferentes y de las que se disponen de tendencias significativas de 2012 a 2014. Teniendo en cuenta que la temperatura desciende a razón de 6°C por cada kilómetro que ascendemos en altitud, los resultados obtenidos implican que, para 1°C de incremento en la temperatura, estas especies adelantan su fenología en 4,48 días. Dado que las previ-

siones de cambio climático de aquí a final de siglo predicen un aumento en torno a los 2 y 6 °C para las temperaturas máximas y de 1 y 4 °C para las temperaturas mínimas (capítulo 1), en el 2100 el periodo de vuelo de estos insectos se podría adelantar entre 6,7 y 22,4 días aproximadamente.

A pesar de la limitación de la serie temporal existente, se ha podido establecer una estrecha relación entre la ocurrencia de primaveras (periodos marzo-junio) cálidas y la sincronización de la emergencia de adultos a lo largo de gradientes altitudinales. Este hecho, sugiere que el calentamiento del clima a escala local minimiza las diferencias en las fenofases de organismos poiquiloterms, como las mariposas, a lo largo del gradiente altitudinal.

El caso particular de la mariposa Apolo de Sierra Nevada

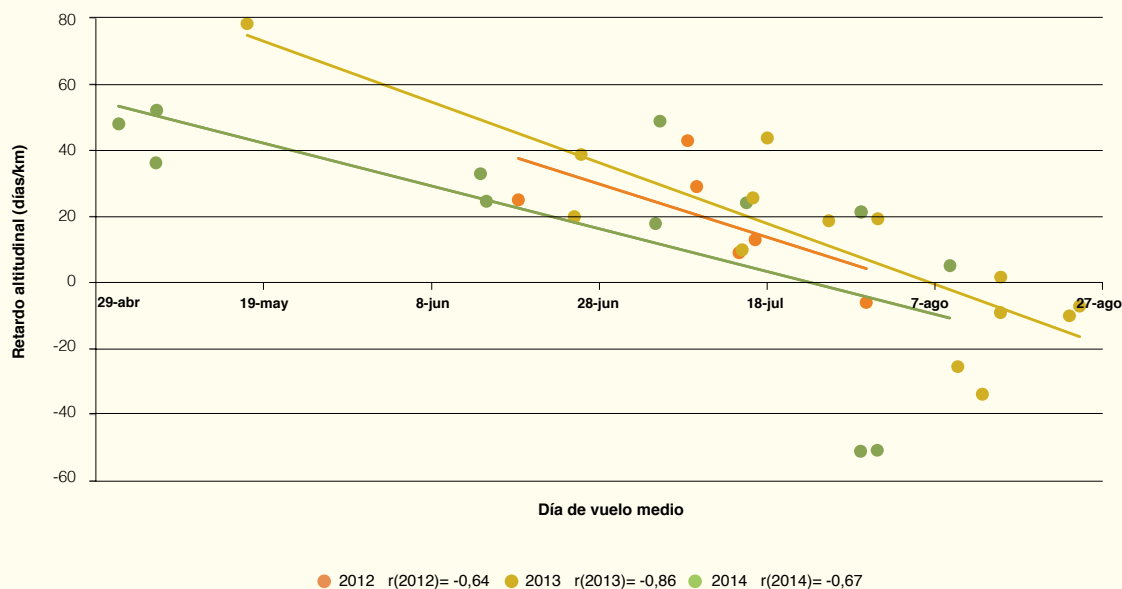
Los patrones observados en la localidad de Laguna Seca establecen una estrecha relación entre los meses de mayo cálidos y el adelanto fenológico y también se pone de relieve el proceso inverso. Mayo es un mes clave para la mariposa apolo de Sierra Nevada, pues durante este periodo las larvas de 5ª edad concluyen su desarrollo y se produce un incremento exponencial en su peso y en su tamaño (datos inéditos). Cuantas más horas al día se den las condiciones climáticas apropiadas para que las larvas permanezcan activas, mayor será su tasa de crecimiento y antes puparán, lo que a su vez puede provocar un adelanto en las fechas de vuelo de los adultos. Además, durante la serie de años analizada la temperatura del mes de

mayo está correlacionada positivamente con la temperatura media de los meses previos (febrero-mayo, $r_s = 0,81$; p-valor $< 0,05$), lo que favorece la actividad de las larvas y la acelera-

ción de su crecimiento y desarrollo. Los datos aquí mostrados ofrecen evidencias desde dos puntos de vista diferentes (gradiente temporal y gradiente altitudinal) de cuáles es-

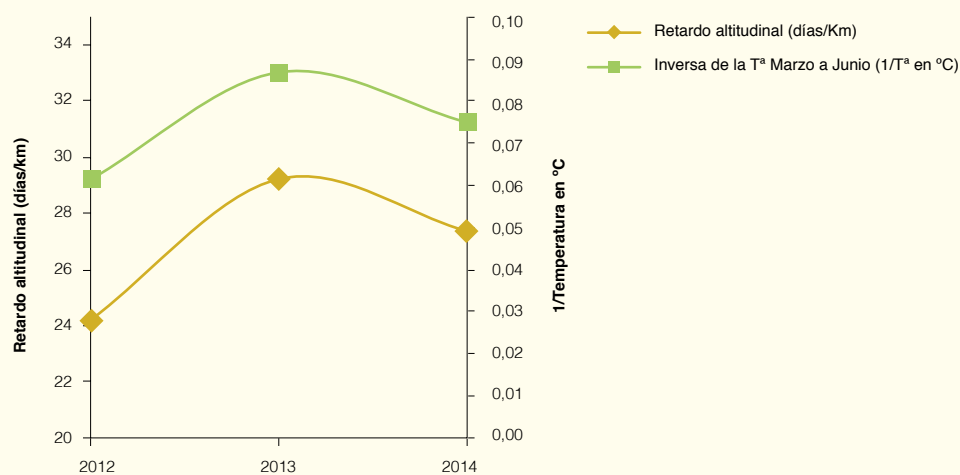
tán siendo y cuáles serán las repercusiones del cambio climático sobre las poblaciones de este elemento clave en las comunidades de insectos de la alta montaña mediterránea.

Figura 1



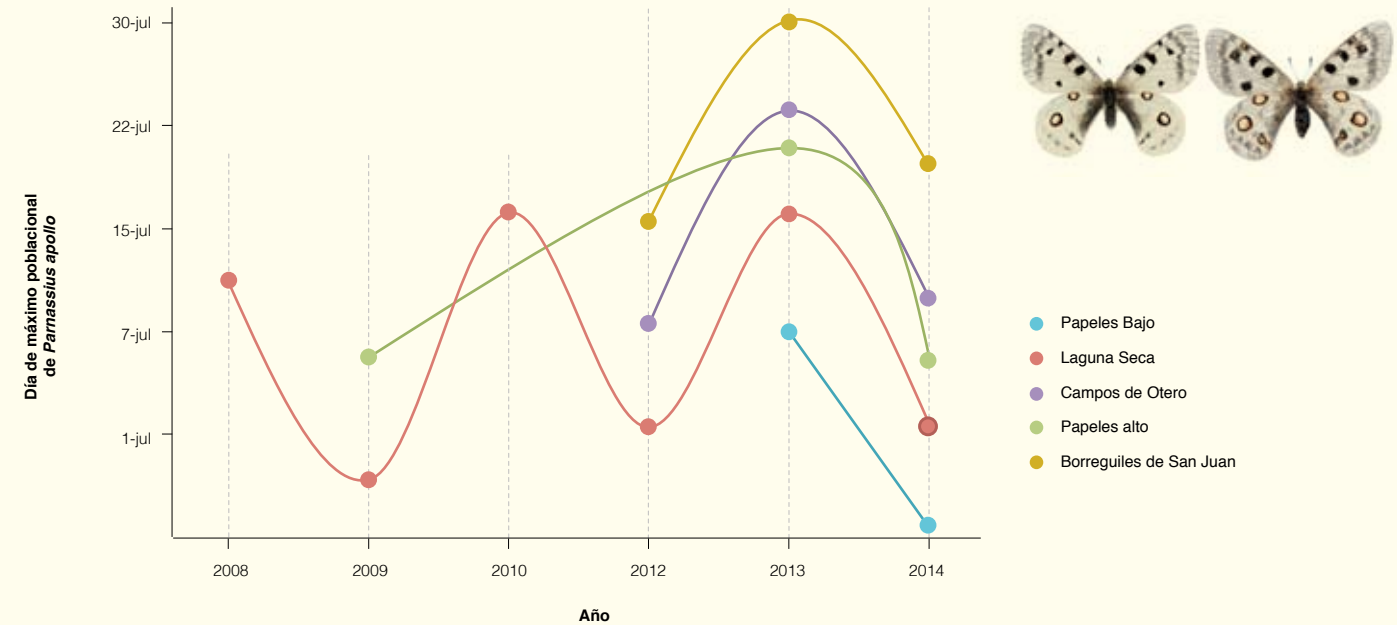
Regresión lineal entre el retardo altitudinal y la fecha media global. Cada punto representa una especie y un año.

Figura 2



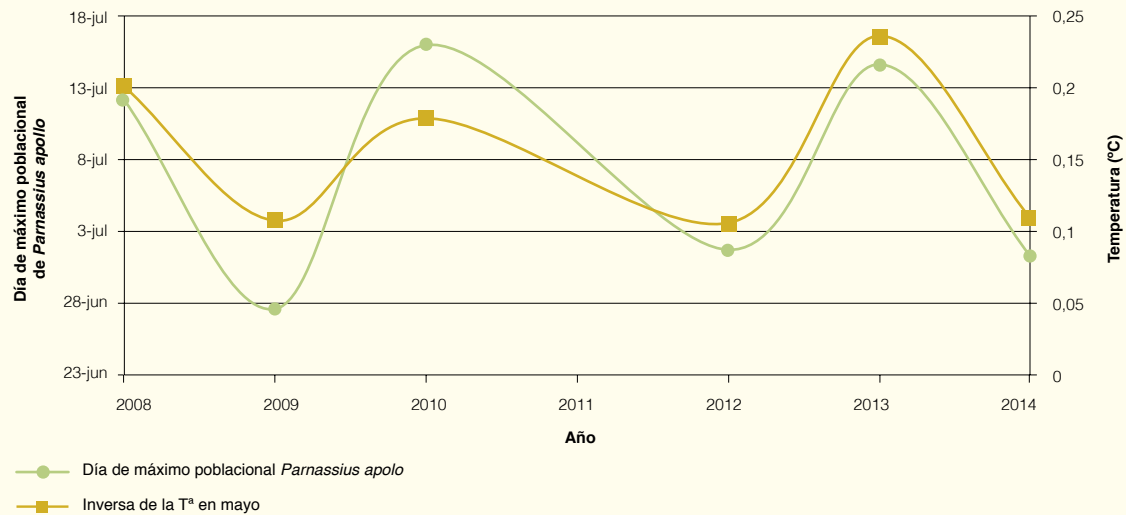
Retardo altitudinal medio para cinco especies (*P. apollo*, *M. lachesis*, *A. crataegi*, *H. lycaon* y *L. alciphron*) de 2012 a 2014 e inversa de la temperatura media de marzo a junio (registrada en 5 estaciones meteorológicas situadas entre 600 y 2.150 msnm).

Figura 3



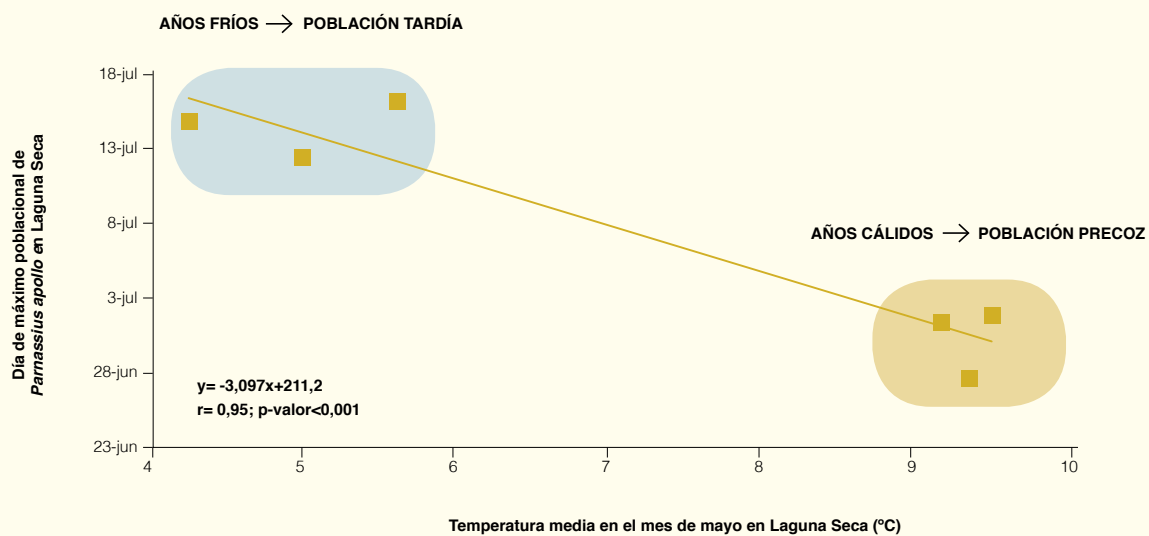
Fecha media de vuelo para *Parnassius apollo* en 2008 (1 localidad), 2009 (2 locs.), 2010 (1 loc.), 2012 (3 locs), 2013 (5 locs.) y 2014 (5 locs.).

Figura 4



Fecha media de vuelo para *Parnassius apollo* y evolución de la Tª media en el mes de mayo en Laguna Seca.

Figura 5



Regresión lineal entre el día de máximo poblacional de *Parnassius apollo* y los valores de T^{a} media en el mes de mayo en Laguna Seca.



Parnassius apollo recién emergida con la Laguna Seca (2.280 m) al fondo.

Bibliografía

› Más referencias en http://refbase.iecolab.es/ref_dossier_resultados.html

6.1. Cambios temporales en la diversidad, abundancia y fenología de las comunidades vegetales: un estudio de 25 años en los borreguiles

[1] Sánchez-Rojas, C.P. (2012). Pastos húmedos de alta montaña: borreguiles. Pp: 76-77. En: Aspizua, R.; Barea-Azcón, J.M.; Bonet, F.J.; Pérez-Luque, A.J. & Zamora, R. (Eds.). *Observatorio de Cambio Global Sierra Nevada: metodologías de seguimiento*. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía.

[2] Pérez-Luque, A.J.; Sánchez-Rojas, C.P.; Zamora, R.; Pérez-Pérez, R. & Bonet, F.J. (2015). Dataset of Phenology of Mediterranean high-mountain meadows flora (Sierra Nevada, Spain). *Phytokeys*, 46: 89-107.

[3] Fernández-Calzado, M.R.; Molero-Mesa, J.; Merzouki, A. & Casares-Porcel, M. (2012). Vascular plant diversity and climate change in the upper zone of Sierra Nevada, Spain. *Plant Biosystem*, 146(4): 1044-1053.

6.2. Cambios en la floración a lo largo de gradientes ambientales

[4] Valladares, F.; Gianoli, E. & Gómez, J.M. (2007). Ecological limits to plant phenotypic plasticity. *New Phytologist*, 176: 749-763.

6.3. Fenología de mariposas diurnas en Sierra Nevada

[5] Pollar, E. & Yates, T.J. (1993). *Monitoring butterflies for ecology and conservation*. Champan & Hall, London.

[6] Gutierrez-Illán, J.; Gutierrez, D.; Diez SB. & Wilson R.J. (2012). Elevational trends in butterfly phenology: implications for species responses to climate change. *Ecological Entomology*, 37: 134-144.

Cuantificación de flujos de carbono en sistemas naturales y perturbados: evaluación de fuentes y sumideros de CO₂

La caracterización del ciclo global del carbono en los distintos ecosistemas terrestres se ha convertido en un hito esencial para promover políticas de gestión del cambio climático. La monitorización de los intercambios de CO₂ y la consiguiente evaluación de la productividad primaria de la vegetación nos ayuda a comprender el funcionamiento del ecosistema a distintas escalas espaciales y temporales.

Actualmente existe abundante información sobre el papel de los ecosistemas terrestres forestales como fuente o sumidero de carbono en Europa. Sin embargo, la información es mucho más escasa en lo que respecta a los ecosistemas mediterráneos, donde hay que considerar no sólo el papel de los bosques, sino también

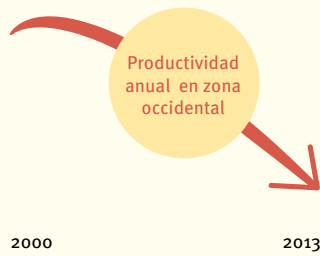
el de los matorrales y los cultivos extensivos, como el olivar, que ocupan grandes superficies.

La Junta de Andalucía se comprometió a luchar contra el cambio climático y a implicarse en el protocolo de Kioto junto al estado español a través de la creación de la Estrategia Andaluza ante el Cambio Climático. Dentro de este contexto, se han iniciado investigaciones para cuantificar el flujo de CO₂ asimilado o emitido por los distintos ecosistemas andaluces.

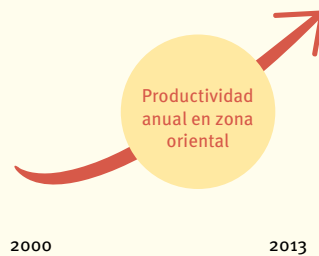
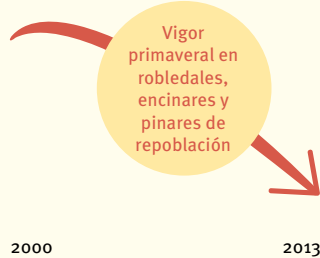
Hay dos técnicas básicas para la cuantificación de la cantidad del CO₂ absorbido (o emitido) por los ecosistemas: los métodos basados en imágenes de satélite y las torres micrometeorológicas (*Eddy Covariance*), que proporcionan

medidas de campo directas del flujo de CO₂ a escala de ecosistema. El empleo de la teledetección para estudiar los procesos ecológicos nos permite trabajar a escalas mayores, y analizar procesos biofísicos integrados desde una perspectiva funcional.

Gracias a la relación con la productividad primaria neta, los índices espectrales de vegetación son frecuentemente empleados para elaborar indicadores del funcionamiento ecosistémico, tales como el carbono total anual absorbido por la vegetación, o la estacionalidad y fenología de la dinámica de las ganancias de carbono. Ello permite desarrollar un sistema de seguimiento para evaluar las tendencias a largo plazo y detectar anomalías espaciales y temporales en



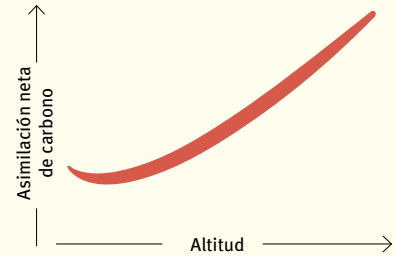
Máxima actividad en mayo-junio en ecosistemas forestales



Mínima actividad en invierno en ecosistemas forestales

Acoplamiento nieve/productividad

en los robledales occidentales de Sierra Nevada. Adelantos en la fecha de retirada de la nieve coinciden con aumentos de la productividad en verano



Los ecosistemas más productivos son

Robledales y bosques de *Pinus sylvestris* autóctono

Mayor asimilación

de carbono en parcelas experimentales donde no se extrae madera tras un incendio

Resumen gráfico de los principales resultados descritos en el presente capítulo. Se muestra la evolución temporal de la productividad y del vigor de la vegetación. Asimismo mostramos la relación entre la asimilación neta de carbono y la altitud.

el funcionamiento de los ecosistemas a través de índices integradores, cuyos valores pueden validarse con los datos de campo que aportan las torres Eddy.

Los principales ecosistemas de Sierra Nevada difieren en sus valores de producción primaria, pero muestran similitudes en su fenología, con máximos de actividad fotosintética en primavera tardía (mayo-junio), y mínimos en invierno (a excepción del matorral de media montaña, único ecosistema con mínimos de verano). Los ecosistemas más productivos son los robledales de *Quercus pyrenaica*, los pinares de autóctonos de *Pinus sylvestris* subsp. *nevadensis* y las plantaciones de coníferas.

Las tendencias en los atributos funcionales del Índice de Vegetación Mejorado (EVI) mostraron un gradiente altitudinal y de orientación este-oeste en Sierra Nevada. En el extremo oriental de la Sierra, se observa un incremento de la productividad anual, mientras que en el centro y oeste disminuye la productividad. Esta divergencia está relacionada con los dos patrones climáticos regionales que operan en Andalucía, teniendo un mayor efecto la Oscilación del Atlántico Norte en el oeste de la Sierra, y la Oscilación del Mediterráneo Occidental en el sector oriental de la misma. Robledales, encinares y plantaciones de coníferas sufrieron un retraso y pérdida de vigor al comienzo de la estación de crecimiento (abril).

Los ecosistemas de Sierra Nevada muestran una gran variabilidad en el intercambio neto anual de carbono, dependiente de la temperatura y precipitación. El seguimiento realizado en tres ecosistemas situados a diferentes cotas altitudinales muestra un incremento neto de la asimilación de carbono con la altitud. También se observa una mayor asimilación neta de carbono en las parcelas experimentales donde no se ha hecho saca de madera tras un incendio, lo que indica que la vegetación se recupera antes (y por tanto, mejora su capacidad de asimilación de carbono) si no hay intervención posterior al incendio.

7.1. Cambios en la productividad de la vegetación mediante teledetección

Alcaraz-Segura, D.^{1,2}; Reyes, A.² y Cabello, J.²

¹ Universidad de Granada ² Universidad de Almería

Resumen

El análisis de las series temporales de índices espectrales de vegetación suministradas por el sensor MODIS desde 2001 hasta 2013, aporta resultados muy interesantes sobre el funcionamiento (productividad, estacionalidad, y fenología de la dinámica de ganancias de carbono) de los ecosistemas de Sierra Nevada. Los robledales, los pinares de repoblación y los encinares muestran fuertes tendencias negativas de verdor al inicio de la primavera. Los robledales y matorrales de alta y media montaña presentan ligeras tendencias positivas durante el verano y principios del otoño. Por último se observa un gradiente este-oeste en la tendencia de verdor. En el este hay un aumento en la producción anual y en el oeste una disminución. Esto puede estar relacionado con los patrones climáticos de precipitación a escala regional.

> Objetivos y metodología

El objetivo de este trabajo es detectar y describir cambios en diferentes atributos de la dinámica estacional de las ganancias de carbono, indicadores de la producción primaria, estacionalidad y fenología de los ecosistemas de Sierra Nevada. Para ello se emplean series temporales de índices espectrales de vegetación.

Los índices espectrales de vegetación constituyen la mejor herramienta para el seguimiento de la productividad primaria de los ecosistemas a nivel global mediante imágenes de satélite [1]. Estos índices muestran una respuesta lineal con la fracción de la radiación fotosintéticamente

activa interceptada por la vegetación (FRFA). Gracias a la relación con la productividad primaria neta, los índices espectrales de vegetación son frecuentemente empleados para derivar indicadores del funcionamiento ecosistémico, tales como el carbono total anual absorbido por la vegetación, o la estacionalidad y fenología de la dinámica de las ganancias de carbono [2]. Las imágenes del Índice de Vegetación Mejorado (EVI) fueron obtenidas por el sensor MODIS-Terra entre enero de 2001 y diciembre de 2013 (producto MOD13Q1). Estas imágenes tienen una resolución espacial de 231 m y temporal de 16 días (23 imágenes por año). En primer lugar,

obtuvimos la curva estacional de EVI de cada año y calculamos la media, máximo y mínimo de EVI de cada año. Posteriormente, se exploró la existencia de tendencias en estas variables y en cada compuesto de 16 días a lo largo del periodo 2001-2013 [3]. Las tendencias fueron evaluadas para todo el contexto geográfico de Sierra Nevada y diferenciando entre los distintos ecosistemas representativos del espacio protegido. La selección de píxeles puros representativos de cada ecosistema se realizó a partir de la cartografía de ecosistemas del Observatorio del Cambio Global de Sierra Nevada.

> Resultados

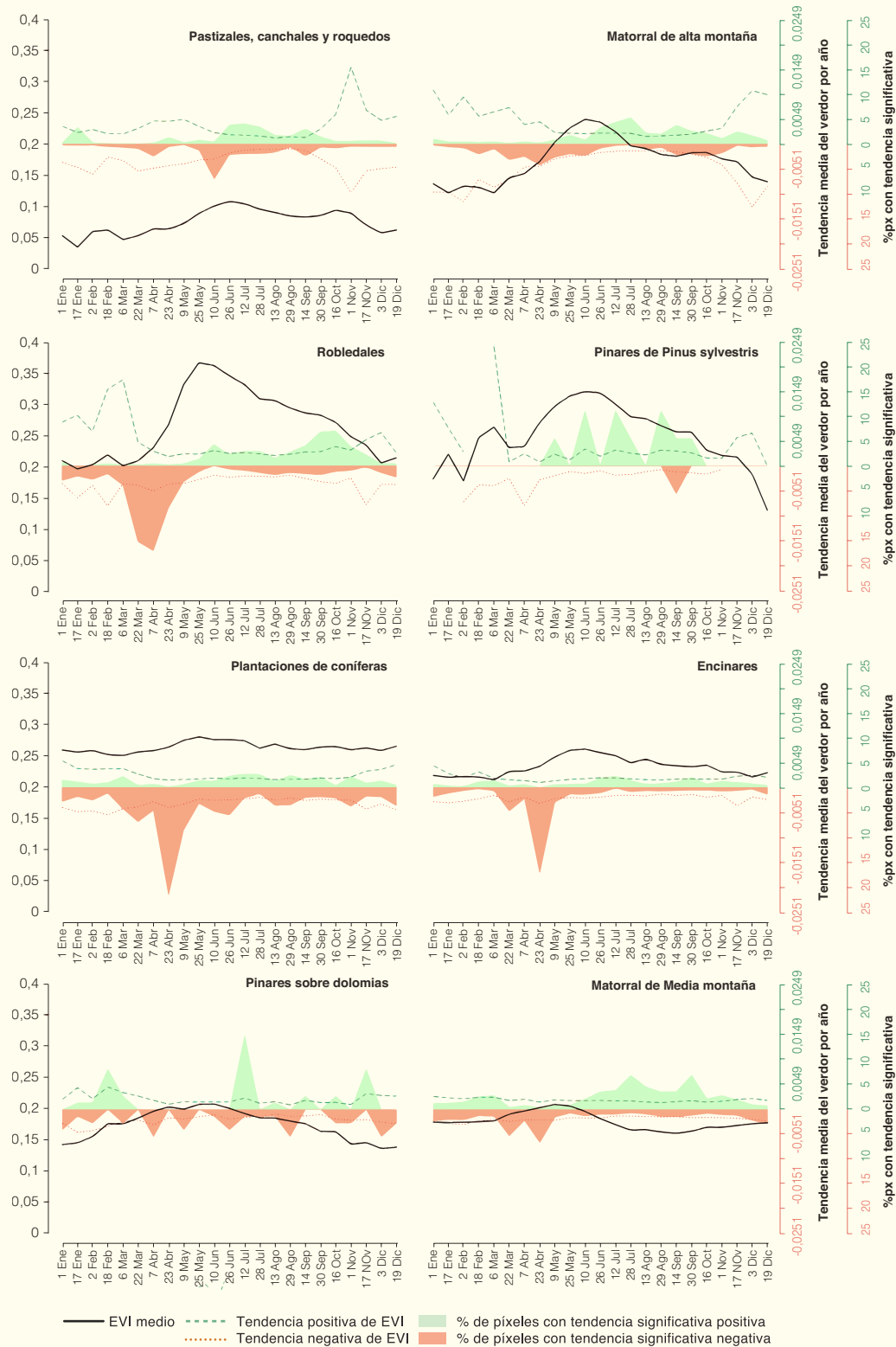
Los principales ecosistemas de Sierra Nevada (Figura 1) difirieron en su producción primaria anual y estacionalidad, pero mostraron similitudes en su fenología, con máximos de actividad fotosintética en primavera tardía (mayo-junio), y mínimos en invierno (a excepción del matorral de media montaña, único ecosistema con mínimos de verano). Los ecosistemas más productivos fueron los robledales de *Quercus pyrenaica*, los pinares de autóctonos de *Pinus sylvestris* y las plantaciones de coníferas. Los encinares y los pinares autóctonos sobre dolomías mostraron una producción primaria intermedia. Los matorrales de alta y media montaña mostraron

valores bajos de producción primaria y los pastizales y roquedos de alta montaña los más bajos. Los ecosistemas con mayor estacionalidad fueron los matorrales de alta montaña y los robledales, mientras que los menos estacionales fueron los encinares y las plantaciones de coníferas.

El patrón espacial de las tendencias en los atributos funcionales del EVI mostró un gradiente altitudinal y de orientación este-oeste (Figura 2). En el extremo oriental de Sierra Nevada, se observa un incremento de la productividad anual, mientras que en el centro y oeste del macizo

montañoso ésta disminuye. En general, los aumentos en la productividad media anual (Figura 2a) estuvieron más motivados por aumentos en los mínimos (Figura 2c) que en los máximos de productividad (Figura 2 b). Por el contrario, las disminuciones en la productividad media anual (Figura 2a) estuvieron más motivadas por disminuciones en los máximos (Figura 2b) que en los mínimos de productividad (Figura 2c).

Figura 1



Dinámica estacional y tendencias del EVI (índice de vegetación mejorado) en el periodo 2001-2012. En el eje azul izquierdo se representa la dinámica estacional promedio del EVI en el ecosistema. En el eje rojo derecho se representa el promedio de las pendientes significativas obtenidas con el test de Mann-Kendall (valor $P < 0.05$).

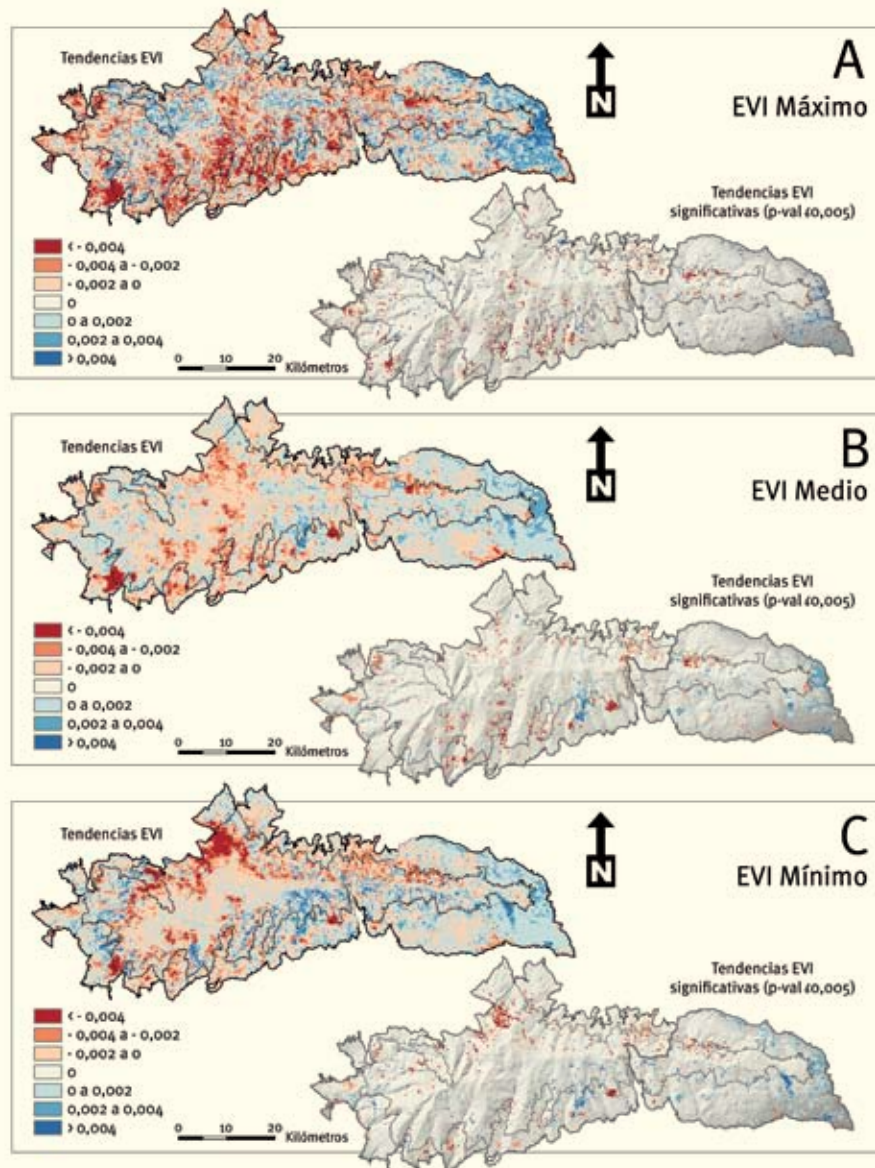
> Discusión y conclusiones

Tres de los ocho ecosistemas analizados en Sierra Nevada mostraron tendencias significativas acusadas en las ganancias de carbono durante el periodo 2001-2013 (Figura 1). Los robledales, las plantaciones de coníferas y los encinares mostraron fuertes tendencias negativas del verdor de la vegetación al comienzo de la primavera, lo que indicaría retraso y pérdida de vigor en el comienzo de la estación de crecimiento [4]. Además, los robledales presentaron ligeras

tendencias positivas en el pico de verdor y a mediados de otoño, lo que indicaría un retraso en la senescencia de la hoja. Los matorrales de alta y media montaña mostraron tendencias similares hacia una ligera caída de la productividad en primavera y un ligero aumento en el verano. El pinar autóctono de *Pinus sylvestris* es el ecosistema que presenta una actividad fotosintética más estable durante el periodo analizado. Por último se observa un gradiente este-oeste en la

tendencia del EVI anual. Esta divergencia está relacionada con los dos patrones climáticos regionales que operan en esta región, teniendo un mayor efecto la Oscilación del Atlántico Norte en el oeste de la Sierra (tendencia hacia menos productividad), y la Oscilación del Mediterráneo Occidental en el este de la misma (tendencia hacia más productividad).

Figura 2

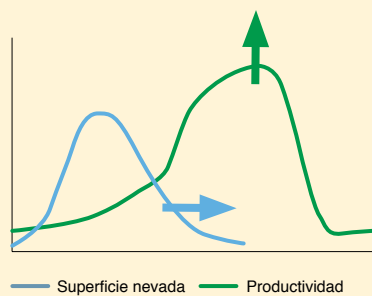


Distribución espacial de las tendencias de tres indicadores del funcionamiento ecosistémico estimadores de la productividad derivados del EVI (índice de vegetación mejorado) en el periodo 2001-2013. Tendencias en el a) promedio anual de EVI, b) máximo anual de EVI, y c) mínimo anual de EVI.

Relaciones entre nieve y productividad de *Quercus pyrenaica*

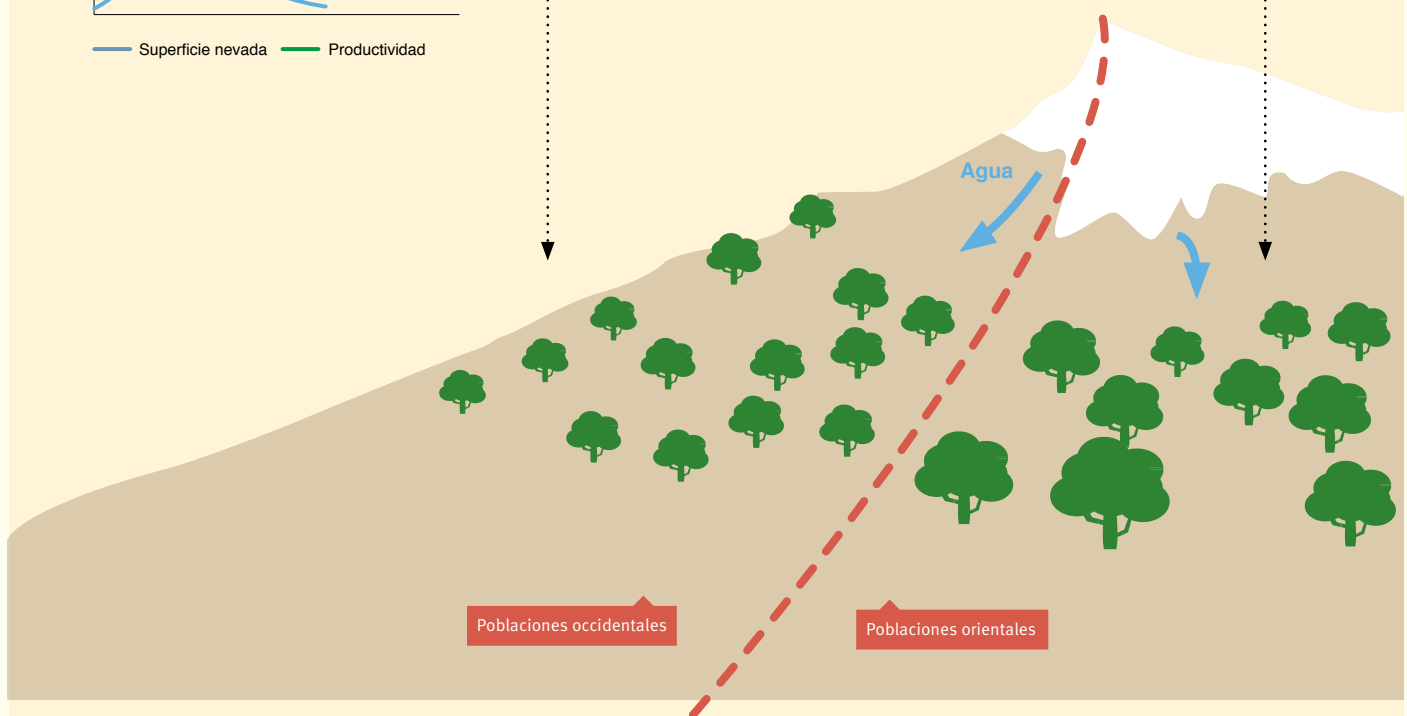
La producción primaria depende de multitud de factores biofísicos. En regiones de montaña como Sierra Nevada, la nieve juega un papel determinante en este sentido. La cantidad de agua suministrada por la nieve puede explicar en parte el funcionamiento de ecosistemas forestales cercanos al límite del árbol. Se ha realizado una evaluación preliminar de las relaciones entre la nieve y la productividad en las poblaciones de roble de Sierra Nevada (*Quercus pyrenaica*). Se ha comprobado que en los

robledales occidentales (cuencas del río Genil y del río Dúrcal) hay cierto acoplamiento entre las tendencias de producción primaria y las de duración de la nieve. Se ha observado que en los robledales donde la nieve muestra una tendencia significativa a retirarse antes, tiende a aumentar la productividad en verano. Esto podría explicarse porque el adelanto en la fusión de la nieve aporta recursos hídricos a los robles en un momento fisiológico adecuado para su crecimiento [5].



> Poblaciones de *Q. pyrenaica* en las que el 60% del territorio muestra tendencias hacia un adelanto de la fecha de retirada de la nieve y un aumento en la productividad en verano.

> Poblaciones de *Q. pyrenaica* en las que la tendencia hacia el adelanto de la fusión de la nieve es débil y no se observa tendencia a aumento de la productividad en verano.



7.2. Intercambios de CO₂ y vapor de agua a escala de ecosistema

Sánchez-Cañete, E. P.¹; Serrano-Ortiz, P.¹; Oyonarte, C.²; Domingo, F.³ y Kowalski, A.S.¹

¹ Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía, Universidad de Granada ² Universidad de Almería ³ Consejo Superior de Investigaciones Científicas

Resumen

La monitorización de los intercambios de CO₂ y vapor de agua contribuye a comprender el funcionamiento del ecosistema a distintas escalas temporales. Los resultados obtenidos en un gradiente altitudinal/bioclimático muestran la relevancia de los factores bioclimáticos en el balance de ambos, y señalan la utilidad del seguimiento a largo plazo de los intercambios de CO₂ y vapor de agua como indicador del funcionamiento de los ecosistemas. En concreto, este estudio proporciona información sobre cómo los ecosistemas mediterráneos responderían al cambio climático. Por otro lado, se aporta información relevante que permite optimizar la actuación antropogénica tras un incendio para favorecer la regeneración del ecosistema.

> Objetivos y metodología

Los intercambios de CO₂ proporcionan información del ecosistema sobre su comportamiento como fuente o sumidero de CO₂, permitiendo discriminar distintos periodos fenológicos. En la época de crecimiento, el ecosistema asimila más CO₂ del que emite, debido principalmente al mayor desarrollo vegetativo. Sin embargo, hay otros periodos en los que predominan las emisiones de CO₂, debido fundamentalmente a la senescencia de la vegetación junto con un aumento de los procesos de degradación de la materia orgánica y un menor contenido de agua en el suelo, favoreciendo la ventilación del CO₂ acumulado en sus poros [6,7].

Las variaciones en los periodos de asimilación y emisión de CO₂ que se observan en los distintos

ecosistemas, están influenciados por factores bióticos, como la vegetación y microorganismos; abióticos, como temperatura y contenido de agua en el suelo fundamentalmente; y antropogénicos, destacando las perturbaciones originadas por los incendios. Por tanto, ecosistemas situados en diferentes pisos bioclimáticos, con unas condiciones determinadas de tipo de vegetación, suelo, temperatura media y precipitación, se comportarán de manera diferente mostrando distintos periodos de fijación y emisión.

En este trabajo, el objetivo es cuantificar y caracterizar el intercambio de CO₂ y vapor de agua en los ecosistemas mediterráneos. Para ello se estudian ecosistemas en un gradiente

altitudinal con condiciones bioclimáticas (precipitación y temperatura) diferenciadas (Figura 1). Igualmente, para estudiar el efecto de los tratamientos post-incendio, se analizan los intercambios de CO₂ y evapotranspiración en dos parcelas de un ecosistema incendiado, una de ellas sometida a procesos de extracción de la madera quemada y otra de ellas no intervenida. Estos estudios se realizaron utilizando torres *Eddy Covariance* capaces de registrar la asimilación o emisión de CO₂ por el ecosistema y su evapotranspiración [8].

> Resultados

Balance de carbono en diferentes condiciones bioclimáticas.

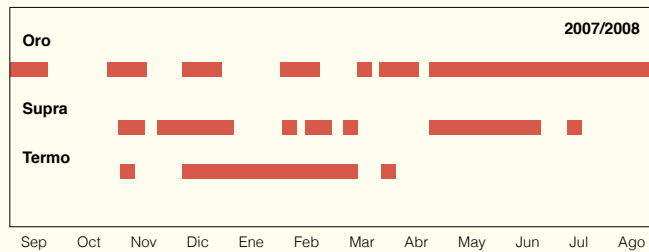
Los resultados obtenidos en los tres ecosistemas de estudio para el año hidrológico 2007/2008 nos muestran un incremento del periodo de asimilación con la altitud (Figura 2), que lleva asociado un incremento neto de

asimilación de carbono (Figura 3). El ecosistema más árido, piso termomediterráneo situado en el Parque Natural Cabo Gata-Níjar, se comportó como una fuente de CO₂ emitiendo más CO₂ por respiración y ventilación del suelo que el fijado anualmente por las plantas. A medida que aumenta la precipitación, y a pesar del descenso de temperatura, el balance cambia.

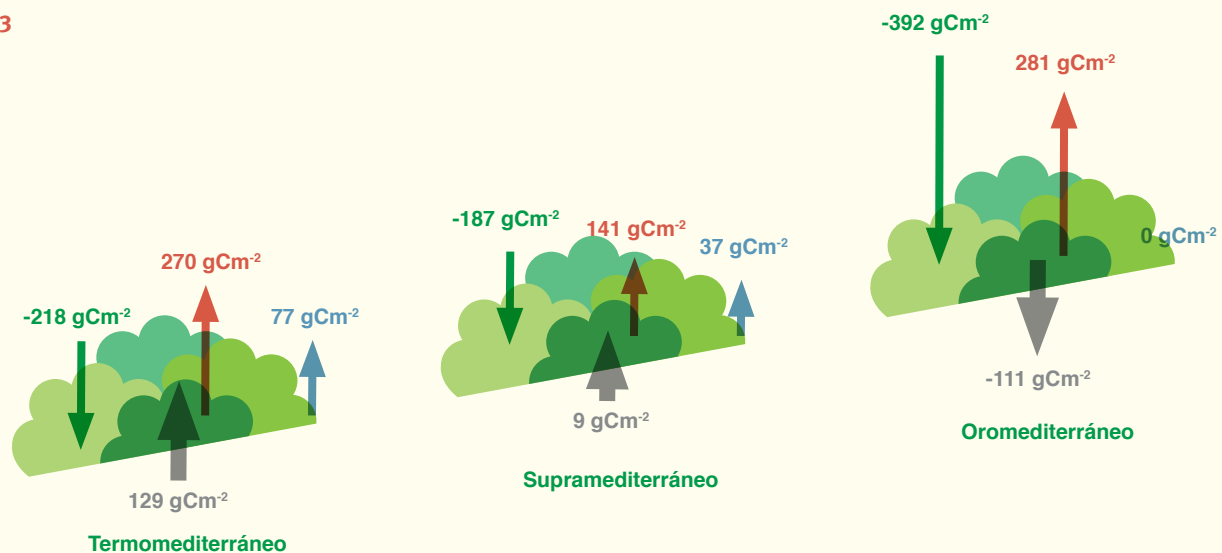
El ecosistema del piso supramediterráneo situado en la Sierra de Gádor se comporta prácticamente de forma neutra, emitiendo un poco más de lo fijado, mientras que el ecosistema del piso oromediterráneo situado en el Parque Nacional de Sierra Nevada se comportó como un sumidero de CO₂.

Figura 1

Imágenes de los tres sitios de estudio considerados en este trabajo. De izquierda a derecha: Piso termomediterráneo (Parque Natural Cabo de Gata-Níjar). Piso supramediterráneo (Sierra de Gádor). Piso oromediterráneo (Parque Nacional de Sierra Nevada).

Figura 2

Periodos de asimilación de tres ecosistemas de matorral mediterráneo ubicados en los pisos bioclimáticos termo- supra- y oromediterráneo. Estos periodos de asimilación se definieron como semanas con un balance neto de asimilación de carbono.

Figura 3

Carbono asimilado por fotosíntesis (flecha verde), emitido por respiración (flecha roja) o por procesos de ventilación del suelo (flecha azul) e intercambio neto total (flecha gris) en el año hidrológico 2007/2008 por tres ecosistemas de matorral mediterráneo ubicados en los pisos bioclimáticos termo- supra- y oromediterráneo. El signo negativo del intercambio neto total denota fijación de carbono por el ecosistema.

Efecto de los tratamientos post-incendio en el balance de carbono

Los distintos manejos de la madera quemada tras un incendio repercuten de manera directa en los balances de CO₂ y agua en el ecosistema. En la zona afectada por el incendio de 2005

en la Loma de Lanjarón, dentro del Parque Nacional de Sierra Nevada, se establecieron dos parcelas con distinto manejo de la madera quemada. Una llamada “No intervención”, donde no se actuó tras el incendio y los árboles quemados permanecieron en pie, y otra llamada “Extracción” donde se retiraron los troncos y

se astillaron las ramas. Tres años después del incendio, “Extracción” se comportó como una fuente de CO₂ mientras que “No intervención” actuó como un sumidero registrándose en ésta una mayor tasa de evapotranspiración debido a una mayor regeneración vegetal (Figura 4).

> Discusión y conclusiones

Los ecosistemas mediterráneos muestran una gran variabilidad en el intercambio neto anual de carbono, comportándose como fuentes de aproximadamente 120 gCm⁻² (termomediterráneo) hasta sumideros de igual magnitud (oromediterráneo). El ecosistema ubicado en el piso termomediterráneo muestra una continua estación de crecimiento durante el invierno, cuando la disponibilidad de agua y las temperaturas permiten una asimilación neta de carbono. Durante el resto del año, ante la falta de agua y las altas temperaturas, se activan los mecanismos adaptativos de las plantas como el cierre estomático provocando una disminución de la asimilación, no recuperándose la fotosíntesis durante los esporádicos eventos de precipitación, como sí ocurre en otros ecosistemas. En el ecosistema supramediterráneo, un incremento en la precipitación y descenso de temperaturas, se traduce en periodos discontinuos de crecimiento que se extienden a casi todo el año, salvo los meses de verano más cálidos y secos y parte de los meses más fríos. En el ecosistema oromediterráneo la asimilación ocurre durante casi todo el año salvo algunos meses en los que el suelo se encuentra cubierto por nieve. Este aumento de los periodos de crecimiento y asimilación neta de carbono con la altitud, podría estar relacionado con un comportamiento distinto de los procesos de fotosíntesis y respiración frente a la temperatura. Aunque un descenso de la temperatura causa una pérdida en la eficiencia fotosintética, éste limita aún más los procesos de respiración del suelo y por lo tanto, incluso en periodos más fríos, con baja actividad biológica, la asimilación de carbono predomina [9].

Finalmente, en cuanto a los tratamientos post-incendio, seis principales argumentos podrían justificar la asimilación neta de carbono en la

parcela incendiada no intervenida frente a la emisión neta de carbono en la parcela “Extracción” tres años después del incendio [10]:

- 1) Mejora de la fertilidad del suelo. La madera quemada de los árboles y restos leñosos representan una enorme reserva de nutrientes que si se deja *in situ* se incorporará progresivamente al suelo.
- 2) Mejora de las condiciones microclimáticas. El efecto de los árboles quemados y las ramas modifican la micrometeorología facilitando la regeneración de las plantas.

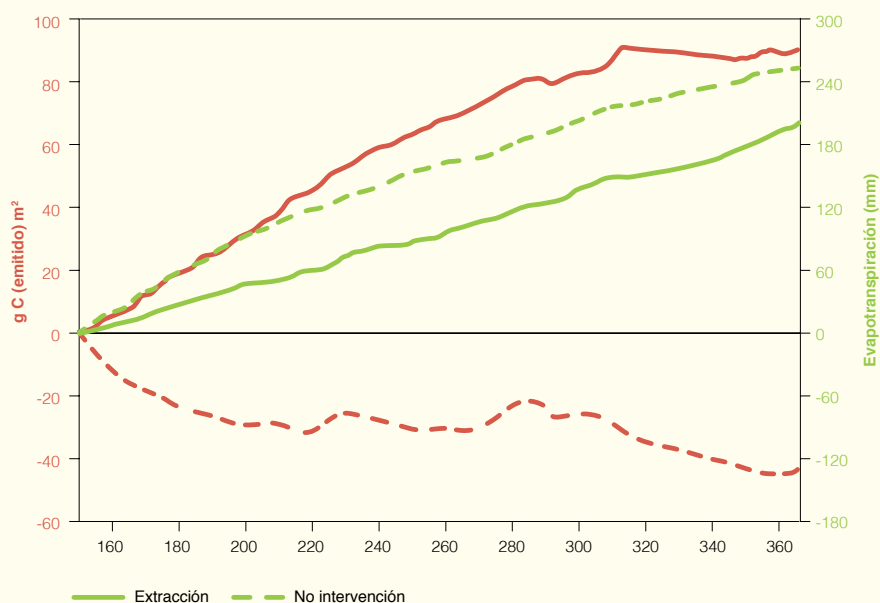
3) La retirada de madera afecta negativamente a la regeneración. La saca de madera produce un daño en el banco de semillas y brotes reduciendo con ello la densidad de plantas.

4) Reducción de la herbivoría por presencia de ramas y troncos.

5) Reducción de la erosión, minimizando la escorrentía.

6) Atracción de semillas dispersadas por aves.

Figura 4



Gráfica acumulada de la cantidad de carbono emitido a la atmósfera (gCm⁻²) y evapotranspiración (mm) en los tratamientos post-incendio de “No intervención” y “Extracción” desde junio hasta Diciembre de 2009.

Bibliografía

› Más referencias en http://refbase.iecolab.es/ref_dossier_resultados.html

7.1 Cambios en la productividad de la vegetación mediante teledetección.

- [1] Cabello, J. & Paruelo, J.M. (2008). La teledetección en estudios ecológicos. *Ecosistemas*, 17 (3): 1–3.
- [2] Alcaraz-Segura, D.; Cabello, J. & Paruelo, J. (2009). Baseline characterization of major Iberian vegetation types based on the NDVI dynamics. *Plant Ecology*, 202 (1): 13–29.
- [3] Alcaraz-Segura, D.; Cabello, J.; Paruelo, J.M. & Delibes, M. (2009). Use of descriptors of ecosystem functioning for monitoring a national park network: a remote sensing approach. *Environmental Management*, 43 (1): 38–48.
- [4] Dionisio, M.A.; Alcaraz-Segura, D. & Cabello, J. (2012). Satellite-based monitoring of ecosystem functioning in protected areas: recent trends in the oak forests (*Quercus pyrenaica* Willd.) of Sierra Nevada (Spain). Pp: 355–374. En: Stephen S. Young & Steven E. Silvern, (Eds.) *International Perspectives on Global Environmental Change*. InTech.
- [5] Pérez-Luque, A.J.; Pérez-Pérez, R.; Bonet-García, F.J. & Magaña, P.J. (2015). An ontological system based on MODIS images to assess ecosystem functioning of Natura 2000 habitats: A case study for *Quercus pyrenaica* forests. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 37: 142–151.

7.2 Intercambios de CO₂ y vapor de agua a escala de ecosistema.

- [6] Kowalski, A.S.; Serrano-Ortiz, P.; Janssens, I.A.; Sánchez-Moral, S.; Cuezva, S.; Domingo, F.; Were, A. & Alados-Arboledas, L. (2008). Can flux tower research neglect geochemical CO₂ exchange?. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148 (6-7): 1045–1054.
- [7] Sanchez-Cañete, E.P.; Serrano-Ortiz, P.; Kowalski, A.S.; Oyonarte, C. & Domingo, F. (2011). Subterranean CO₂ ventilation and its role in the net ecosystem carbon balance of a karstic shrubland. *Geophysical Research Letters*, 38 (9): L09802.
- [8] Baldocchi, D.D. (2003). Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rate of ecosystem: past, present and future. *Global Change Biology*, 9: 479–792.
- [9] Aires, L.M.I.; Pio, C.A. & Pereira, J.S. (2008). Carbon dioxide exchange above a Mediterranean C₃/C₄ grassland during two climatologically contrasting years. *Global Change Biology*, 14 (3): 539–555.
- [10] Serrano-Ortiz, P.; Marañón-Jiménez, S.; Reverter, B.R.; Sánchez-Cañete, E.P.; Castro, J.; Zamora, R. & Kowalski, A.A. (2011). Post-fire salvage logging reduces carbon sequestration in Mediterranean coniferous forest. *Forest Ecology and Management*, 262: 2287–2296.

Capítulo 8

Los robledales son socioecosistemas estratégicos por el intenso aprovechamiento que han experimentado a lo largo de su historia y por su extraordinario valor ecológico. Las poblaciones nevadenses sufren los efectos de la sequía y el incremento de la temperatura provocados por el cambio climático.

Hacia una gestión que favorezca la adaptación de los ecosistemas forestales nevadenses al cambio global

Actualmente los bosques afrontan unas condiciones climáticas cambiantes, con un aumento previsto de temperatura de entre 1,5 y 2°C para finales de este siglo, un contraste más acentuado de las precipitaciones y un aumento del CO₂ atmosférico. La influencia antrópica en este proceso está fuera de duda, tanto que ha dado nombre a esta etapa de la historia (Antropoceno) y se ha incorporado en la propia definición de cambio global. Éste se entiende como el conjunto de cambios en los procesos fundamentales que definen el funcionamiento del sistema Tierra derivados de la actividad humana: sobreexplotación de recursos, cambio climático, pérdida de biodiversidad, cambios de uso del suelo, contaminación, etc.

Y si no hay dudas sobre nuestro impacto en este proceso, tampoco puede haberlas sobre la responsabilidad que tenemos a la hora de gestionar los recursos naturales del Planeta en los nuevos escenarios. Por ello, desde el Parque Nacional y Natural de Sierra Nevada se apuesta por una gestión adaptativa, combinando el conocimiento científico existente sobre los ecosistemas con la experiencia adquirida en campo. Así, la propia gestión que se realiza de los montes se convierte en objeto de seguimiento y análisis dentro del Observatorio del Cambio Global de Sierra Nevada. Partiendo de la incertidumbre que domina nuestra interacción con los sistemas naturales, el planteamiento de las preguntas, el diseño experimental, la toma

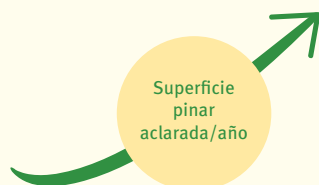
de datos, el análisis y la interpretación de los resultados obtenidos se abordan iterativamente en un proceso adaptativo.

El objetivo de este capítulo es resumir lo aprendido hasta la fecha con esta filosofía de actuación, resaltando una serie de recomendaciones de gestión que, aunque surgidas de experiencias de colaboración entre científicos y gestores en Sierra Nevada, pueden ser de aplicación en otros ecosistemas forestales mediterráneos de características similares.

En primer lugar se realiza una síntesis retrospectiva de las principales actuaciones forestales llevadas a cabo en Sierra Nevada desde 1935



Años 50 Actualidad



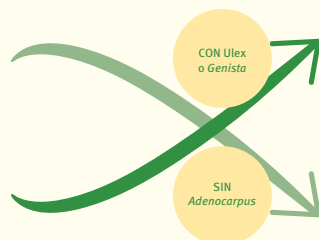
Años 50 Actualidad



Años 50 Actualidad

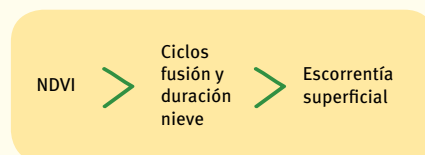
Los restos de madera quemada

Favorecen el reclutamiento y crecimiento de brinzales de leñosas

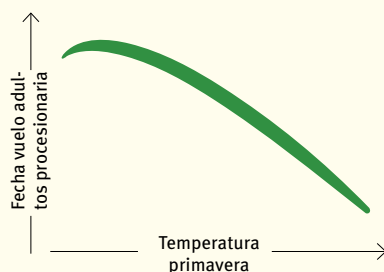
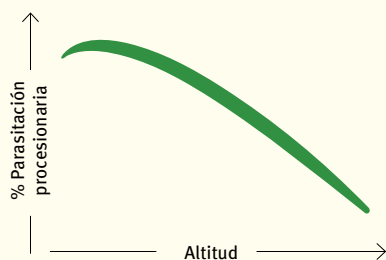


2010 2013

Supervivencia de repoblaciones con leñosas de crecimiento rápido

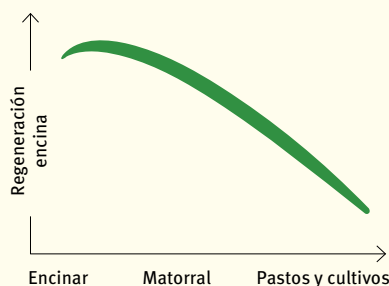


Influencia en deslizamientos, flujos y desprendimientos de ladera

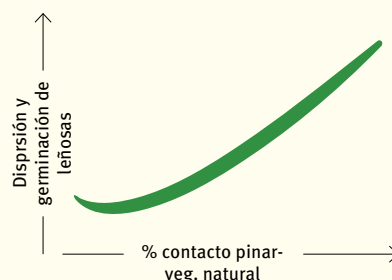
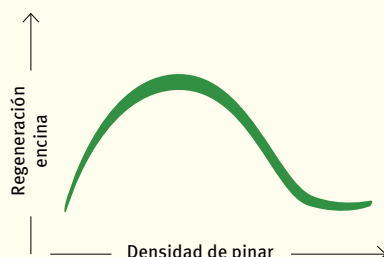


Los robledales experimentan

un ascenso altitudinal y colonizan otros hábitats (cultivos abandonados y pinares de repoblación)



Intensidad de uso en el pasado



Resumen gráfico de los principales resultados descritos en el presente capítulo. Se muestran cambios observados en la gestión forestal, cuestiones relacionadas con el comportamiento de la vegetación tras un incendio, así como la influencia analizada de determinadas variables en las pérdidas de suelo, el comportamiento de la procesionaria del pino y el funcionamiento de robledales, encinares y pinares.

hasta la actualidad, a partir del análisis de un catálogo espacializado de proyectos forestales. La información recopilada permite evaluar la evolución temporal de variables como superficie repoblada/año, densidad de las repoblaciones, ratio de superficie frondosas/coníferas o superficie aclarada. Así, se comprueba cómo en el pasado el mayor esfuerzo se centró en repoblar con pinares extensas superficies, mientras que en la actualidad se invierte fundamentalmente en mejorar la estructura de las masas para favorecer su evolución e incrementar su resiliencia, limitándose las plantaciones a la restauración de zonas mucho más localizadas e incorporando en ellas criterios ecológicos. Como ejemplo novedoso de una de estas actuaciones, se exponen algunos resultados de un ambicioso programa de restauración llevado a cabo en la zona de Lanjarón tras un incendio ocurrido en 2005. Esta restauración experimental se basa en el fomento de la heterogeneidad espacial del paisaje y de la diversidad funcional de las especies utilizadas, así como en potenciar los mecanismos sucesionales de recuperación de las comunidades. El seguimiento de esta restauración constata la importancia de aprovechar los elementos que puedan quedar o crecer de manera natural tras un incendio (restos de

madera quemada o matorral autóctono) para facilitar la regeneración natural y la supervivencia de plantaciones de matorral o arbolado.

Por otro lado, se analiza la evolución temporal de poblaciones de una plaga forestal muy importante: la procesionaria del pino (*Thaumetopoea pityocampa*). Esta especie está incrementando e intensificando la frecuencia de sus ataques durante las últimas décadas [11-12]. El cambio climático afecta tanto a su fenología (acelerando su desarrollo) como a su distribución (favoreciendo que ascienda en altitud, donde tiene menos enemigos naturales). Ante esto, se propone una estrategia de prevención basada en el manejo del hábitat, planificando el desarrollo de formaciones forestales diversas en estructura espacial y composición específica. Esta configuración del bosque es más resistente y resiliente frente a las plagas y otros procesos de decaimiento forestal.

Con el fin de orientar el desarrollo de este tipo de bosques a partir de las más de 30.000 ha de pinar de repoblación que hay en Sierra Nevada, se plantean una serie de recomendaciones de gestión basadas en evidencias suministradas por varios estudios realizados en el marco del

Observatorio del Cambio Global de Sierra Nevada. Las variables ambientales (clima, altitud), la estructura del paisaje (fragmentación, tamaño y densidad de los parches de pinar, posición y contacto de los parches de vegetación autóctona) y el uso del suelo en el pasado explican en buena medida tanto la estructura (diversidad) como el funcionamiento (regeneración) de los pinares de repoblación.

De manera similar, se proponen recomendaciones de gestión para favorecer la expansión o recolonización de los rebollares nevadenses de *Quercus pyrenaica*, así como para mejorar el funcionamiento y la capacidad de adaptación de los que ya existen. Estos bosques presentan una alta vulnerabilidad por la combinación de problemas estructurales y unas condiciones ambientales en el límite de su área de distribución. Asegurar un buen estado fisiológico y una regeneración sexual efectiva que permita un adecuado relevo generacional con posibilidad de expansión es fundamental para la supervivencia de estas masas.

Todos estos criterios y recomendaciones van orientados, en última instancia, a favorecer la adaptación de los bosques nevadenses al cambio global, y asegurar así los bienes y servicios que actualmente proveen. El mantenimiento o incluso aumento de su cubierta vegetal es fundamental dadas las previsiones existentes de incremento de la torrencialidad de la lluvia por cambio climático, lo que podría conllevar un mayor número de deslizamientos superficiales y desprendimientos. En este sentido, se ha comprobado que el índice de vegetación normalizado (NDVI), dependiente del clima, tiene un peso importante en el condicionamiento y desencadenamiento de pérdidas de suelo en Sierra Nevada, la mayor parte de las cuales se concentran en la parte suroccidental del macizo.



En el valle del Río Monachil, coinciden robledales con pinares de repoblación (izquierda arriba).

8.1. Historia reciente de la gestión forestal en Sierra Nevada: implicaciones para la adaptación al cambio global

Bonet, F.J.¹; Aspizua, R.² y Navarro, J.³

¹ Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía, Universidad de Granada ² Agencia de Medio Ambiente y Agua ³ Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio

Resumen

La puesta en marcha de planes de gestión adaptativa de los recursos forestales requiere, entre otras cosas, la evaluación de la eficacia de la gestión forestal. Esto es más importante aún en un contexto de cambio global, ya que la incertidumbre sobre la respuesta de los ecosistemas a las actuaciones es mayor. En este sentido, se ha diseñado un catálogo espacializado de actuaciones forestales llevadas a cabo en Sierra Nevada desde 1935 hasta 2014. Dicha información permite evaluar la evolución temporal de variables de interés como la superficie repoblada por año, la densidad de las repoblaciones, o el ratio superficie frondosas / superficie coníferas en las repoblaciones. La superficie repoblada por año sigue una tendencia claramente descendente desde la década de los 70 hasta la actualidad. Se observa también una tendencia ascendente en el ratio frondosas / coníferas en las repoblaciones. Por último, se ha diseñado un índice global de gestión forestal en Sierra Nevada. Este índice tiene en cuenta el tipo de actuación, su intensidad y también el tiempo transcurrido desde su realización hasta la fecha de cálculo del índice. Dicho índice muestra de manera sintética la intensidad de la gestión forestal realizada en Sierra Nevada, que ha ido decreciendo desde la década de los 60.

➤ Objetivos y metodología

El objetivo de este trabajo es analizar las actuaciones forestales realizadas en Sierra Nevada teniendo en cuenta la componente temporal (serie de datos desde 1935 hasta 2014), la espacial (representación espacial de los rodales de actuación) y temática (tipos de actuación: repoblaciones, claras, restauraciones post-incendio). Esto permite conocer los distintos patrones espacio-temporales de las actuaciones forestales, evaluar su relación con las políticas forestales imperantes en cada momento [1] y mejorar el conocimiento sobre los cambios de

uso del suelo [2]. Para ello se sigue una metodología con dos fases: a) Recopilación de la información sobre las actuaciones forestales e integración en una base de datos, teniendo en cuenta que dicha información se encuentra en distintos formatos y en diferentes dependencias de las administraciones públicas competentes en materia forestal. Desde 1990 hay un registro en formato papel de las actuaciones forestales realizadas. Se ha procedido a digitalizar toda la información disponible y a integrarla en una base de datos relacional. En dicha base de da-

tos hay información sobre los distintos rodales de actuación (repoblaciones, claras, clareos, podas, etc.), así como de sus características (intensidad de la actuación, especies plantadas, etc.). b) Análisis e interpretación de la información existente. Mediante consultas a la anterior base de datos se ha construido una historia de la gestión forestal reciente de Sierra Nevada. Los resultados de este trabajo se muestran a continuación.

➤ Resultados

Se han analizado las siguientes variables relacionadas con la gestión de las masas forestales de Sierra Nevada durante las últimas décadas (la representación gráfica se muestra en la Figura 1):

Repoblaciones forestales:

- Evolución de la superficie repoblada por año. Esta variable permite conocer cómo cambia el esfuerzo repoblador por parte de la Administración Ambiental. Se observa un máximo entre la década de 1960 y 1970.

En esa época se plantaron unas 3.000 ha al año. En la actualidad la tasa de repoblación es mucho menor, no llegando en ningún caso a las 500 ha por año.

- Evolución temporal de la relación entre superficie repoblada con frondosas y con coníferas. Los resultados muestran claramente un aumento del número de especies de frondosas utilizadas en las repoblaciones.
- Evolución temporal de la densidad de

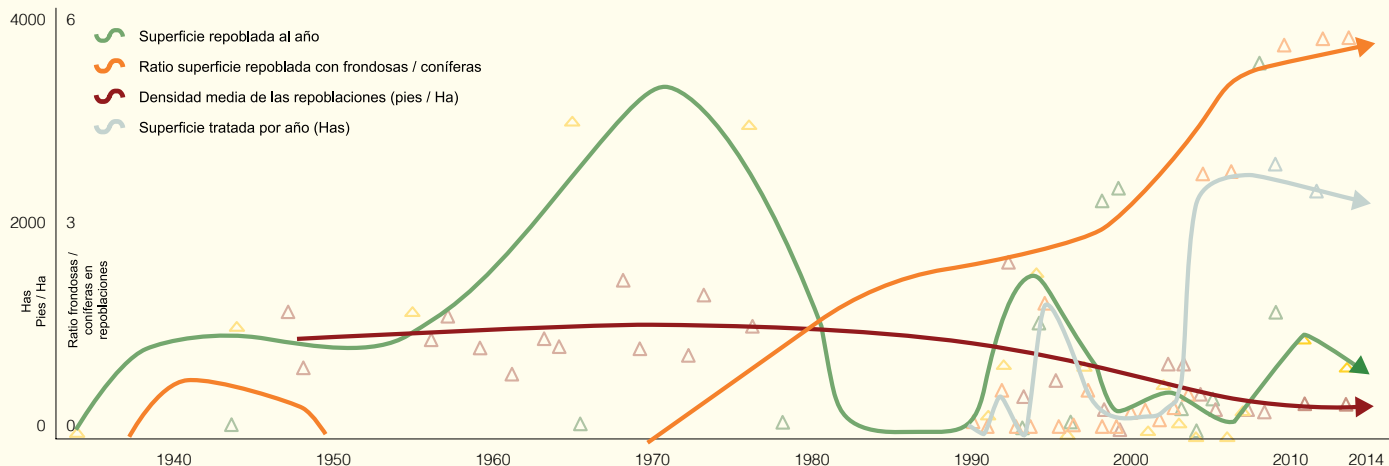
plantación. Con los datos disponibles, se observa también una clara tendencia hacia una menor densidad de las repoblaciones. Esto da idea de la existencia de proyectos cada vez más específicos y adaptados a las necesidades concretas de cada territorio.

Tratamientos selvícolas:

- Se analiza la evolución temporal de la superficie tratada mediante claras/clareos y podas desde 1990 hasta la actualidad.



Figura 1



Evolución temporal de la superficie repoblada por año (naranja claro), ratio superficie repoblada con frondosas/coníferas (naranja oscuro), densidad media de las repoblaciones (pies / Ha) (rojo) y superficie aclarada por año (gris) en Sierra Nevada desde 1930 hasta la actualidad.

Esta variable sufre una oscilación muy intensa, probablemente debida a los pulsos de financiación específica recibida por la Administración autonómica para abordar este tipo de trabajos. No se observa una tendencia clara.

Índice de gestión forestal de Sierra Nevada:

- Se propone la creación de un índice que muestre la “intensidad” de la gestión forestal realizada en Sierra Nevada. Este indicador representa el “grado de gestión” al que están sometidos los ecosistemas

forestales de Sierra Nevada por parte de la Administración Ambiental. El interés de este indicador está en tener una herramienta sencilla, fácilmente comprensible, para visualizar la intensidad de la gestión en el territorio. Para calcular este índice se asume que el grado de gestión es tanto mayor cuanto más intensa fue la actuación en el momento de ejecutarse (Repoblación > clara/clareo > Roza matorral > Resalveo > Poda > Eliminación de residuos). Este efecto se atenúa linealmente con el tiempo. Es decir, a más tiempo transcurrido, menos

intensidad de gestión en un tiempo determinado. La Figura 2 muestra la distribución espacial del índice de gestión forestal en 2014. Los lugares más rojos son aquellos que o bien han sufrido actuaciones más intensas o éstas son más recientes. Se observa cómo la mayoría de las zonas de actuación tienen un grado de gestión bajo (tonos verdes). Corresponden con las grandes repoblaciones realizadas en las décadas de los 60-70 del siglo XX.

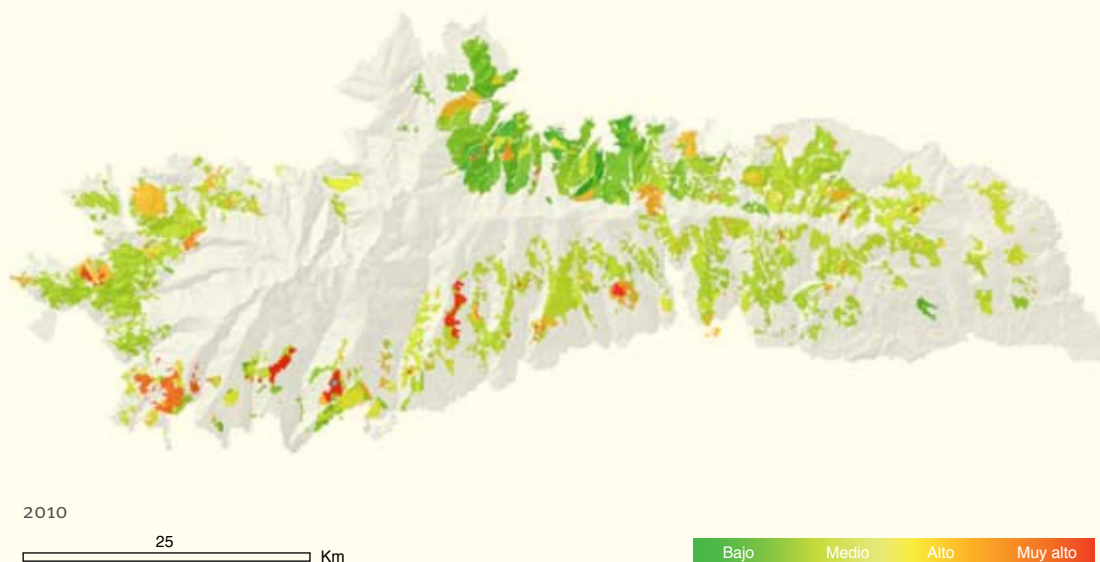


Aspecto del pinar de repoblación del Marquesado del Zenete.



Distribución de planta con caballería en Laujar de Andarax, Abril 2009.

Figura 2



Mapa que muestra el índice de gestión forestal de Sierra Nevada en 2010. Los tonos verdes indican una baja intensidad de gestión. Los rojos lo contrario. La gráfica muestra la evolución temporal del índice propuesto desde 1935 hasta 2010. Se observa un máximo en el índice de gestión durante la década de los 60-80 del siglo XX, coincidiendo con el máximo de superficie repoblada al año en Sierra Nevada.

➤ Discusión y conclusiones

La Figura 1 muestra que las primeras repoblaciones se llevaron a cabo en la década de los 30-40 en el Marquesado y en la Alpujarra granadina por parte del Patrimonio Forestal del Estado [3]. A partir de 1954, con la creación del Servicio Hidrológico Forestal, tuvieron lugar dos décadas de gran intensidad reforestadora, en las que se llegaron a plantar más de 2.000 ha al año. En fechas más recientes los únicos picos de repoblaciones considerables se dan para restaurar zonas incendiadas, como ocurrió en 1995, cuando se repoblaron más de 1.300 ha de las 2.000 que resultaron afectadas por un incendio forestal en 1994 ocurrido en la Alpujarra granadina, o tras el incendio de más de 3.000 ha ocurrido en la zona de Lanjarón, Lecrín y Nigüelas en Septiembre de 2005. Desde finales de 1970 hasta la actualidad ha habido un cambio de tendencia en la política reforestadora. Las grandes repoblaciones se hacían con el objetivo específico de reducir la pérdida de suelo en el territorio, al mismo tiempo que se fomentaba el empleo rural [4]. Actualmente se entiende la repoblación como una respuesta a impactos sobre la cubierta vegetal, como incendios u otros sucesos de carácter

catastrófico, pero también como una forma de diversificar y reforzar la masa forestal. Por otro lado, también resulta evidente (Figura 1) el aumento de la relación entre frondosas y coníferas repobladas. Salvo esporádicas plantaciones de bellotas en la década de los 40 [5], el resto de las repoblaciones hasta bien entrados los 90 tenían a las coníferas como especie mayoritaria, situación que se ha invertido en la actualidad, predominando las frondosas sobre las coníferas. La mayor disponibilidad de recursos para abordar las repoblaciones, la menor superficie repoblada por año y los avances en los conocimientos científicos-técnicos sobre la ecología del bosque mediterráneo, podrían explicar el aumento en el uso de frondosas y la diversificación consiguiente de las repoblaciones. También se observa una clara tendencia a la reducción de la densidad de las plantaciones, pasando de una densidad superior a los 2.000 pies/ha en las décadas de los 60 y 70, hasta densidades en torno a 500-600 en la actualidad.

Por último, el índice de gestión forestal (Figura 2) sintetiza fielmente las tendencias de gestión ya

comentadas. Se observa cómo la intensa actividad repobladora de las décadas 60 y 70 del siglo XX se traduce en un aumento del índice de gestión, que desde ese punto comienza un descenso paulatino hasta la actualidad. Este descenso se debe no sólo a que se realizan actuaciones sobre una superficie menor, sino también a que éstas son menos intensas (menor densidad de repoblación, menor tasa de repoblaciones frente a otro tipo de actuaciones selvícolas a las que se les ha supuesto una menor intensidad de actuación, etc.). Sin embargo, en cuanto a actuaciones recientes, cabe destacar las actuaciones destinadas a clarear extensas superficies de pinares en Sierra Nevada entre 2005 y 2014, financiadas fundamentalmente por la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio con cofinanciación Europea a través de fondos estructurales. Por otra parte, en el índice no se incluyen los tratamientos lineales preventivos contra incendios (manuales o mecanizados, fundamentalmente en fajas cortafuegos), que se realizan de manera regular y distribuidas por todos los montes.

Evolución de las principales actuaciones de gestión forestal en S. Nevada

A partir del análisis de la base de datos de actuaciones forestales y de información procedente de entrevistas a Agentes de Medio Ambiente, gestores y responsables de las principales actuaciones

llevadas a cabo, se resumen a continuación las diferencias cualitativas más significativas encontradas entre la gestión forestal pasada y actual en el espacio natural protegido.

Segunda mitad siglo XX

Primera década siglo XXI

REPOBLACIONES

- Mayor superficie repoblada. Objetivo: restauración hidrológico-forestal a nivel de cuenca, acompañada de obras de ingeniería en el cauce. - Primera fase: plantación manual. Segunda fase: preparación mecanizada del terreno (aterrazado) - Mayor densidad de plantación (>2.000 pies/ha) - Distribución regular de la plantación (a marco cuadrado o al tresbolillo, frecuentemente por terrazas) - Predominio de coníferas frente a frondosas, principalmente <i>Pinus halepensis</i> y <i>P. pinaster</i> en las zonas bajas y en las zonas altas <i>P. nigra</i> (solanas) y <i>P. sylvestris</i> (umbrías). Empleo casi exclusivo de especies arbóreas. - A menudo se combinaba plantación (1-2 saviás) con siembra en el mismo hoyo. - Predominio de planta procedente de semilla alóctona. - Planta procedente de viveros ubicados en el propio monte, con sistemas de producción rudimentarios. Aclimatación previa a las condiciones locales. - Ejecutadas directamente por la Administración Forestal.	- Menor superficie repoblada. Objetivo: fundamentalmente restauraciones tras incendios forestales y núcleos de dispersión para diversificación de masas. - Plantación manual o mecanizada según condicionantes del terreno, sin aterrazamiento. - Densidades de plantación menores. - Distribución de plantación irregular, a menudo por bosquetes. - Mayor proporción de frondosas y de especies leñosas (arbóreas y arbus-tivas) propias del cortejo florístico acompañante a la asociación vegetal natural de la zona. - Predominio de plantación frente a siembra. - Planta de procedencia controlada, con priorización de variedades locales. - Planta procedente de viveros centralizados, provinciales o regionales, con sistemas de producción más avanzados. Planta sin aclimatación previa a las condiciones locales. - Ejecutadas a través de empresas públicas o privadas.
--	--

TRATAMIENTOS SELVÍCOLAS SOBRE PINAR

- Clareos pocos significativos durante las primeras edades del repoblado: eliminación de pies dobles y podas con hacha, especialmente junto a caminos. - Puntualmente, claras con fines comerciales en la década de los 80 y 90.	- A partir de la década de los 90 claras y clareos sobre mayor superficie, predominando los objetivos de conservación (dosificación de la competencia y diversificación de la masa) y preventivos. - Gradualmente el patrón se vuelve más irregular, intentando romper la homogeneidad de la masa. La corta sistemática gradualmente da paso a la combinación de cortas de diferente intensidad, con predominio de 30-50% de pies extraídos.
---	---

RESALVEO Y PODA DE FRONDOSAS (ENCINAS Y ROBLES)

Realizada por la población local para obtención de combustible.	Realizada mayoritariamente por la administración con objetivo de conservación o preventivo. Aprovechamiento secundario como combustible.
---	--

INFRAESTRUCTURAS DE APOYO A LA GESTION Y TERRENOS FORESTALES (NO INCLUIDOS EN EL ÍNDICE DE GESTIÓN FORESTAL)

- Construcción de apriscos por encima de la línea de la repoblación para apoyo al aprovechamiento ganadero de las cumbres. - Apertura de prácticamente toda la red de caminos y vías de saca para apoyo a las actuaciones forestales. - Adquisición de terrenos, en su mayoría tierras agrícolas abandonadas, para patrimonio de la Administración del Estado y reforestación. Consorcio con los Ayuntamientos que dará lugar a los Montes Públicos de los Ayuntamientos.	- Construcción puntual de apriscos. Mantenimiento, mejora y adecuación paisajística de los existentes. - Mantenimiento y mejora de la red de caminos y vías de saca existentes. - Compra de fincas con especial interés para la conservación con la creación del Parque Nacional de Sierra Nevada (en total 6.184 ha)
---	---

8.2. Diseño y seguimiento de la restauración post-incendio en Lanjarón

Zamora, R.¹; Bollullos, C.²; Aspizua, R.²; Cabezas-Arcas, F.M.¹; Castro, J.¹ y Navarro, J.³

¹ Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía, Universidad de Granada ² Agencia de Medio Ambiente y Agua ³ Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio

Vista panorámica desde la zona incendiada en el municipio de Lanjarón. En primer plano puede apreciarse como el tomillar-lastonar recoloniza la zona incendiada.



Resumen

En septiembre del año 2005 se produjo en Sierra Nevada un incendio que afectó a unas 1.100 ha de pinares de repoblación. Posteriormente se puso en marcha un ambicioso programa de restauración, en el que han colaborado los técnicos y gestores del Parque Nacional y Natural de Sierra Nevada y la Agencia de Medio Ambiente y Agua con investigadores de la Universidad de Granada. El diseño de este proyecto es novedoso, ya que aplica los más recientes conocimientos científicos para favorecer un nuevo modelo de monte acorde con los retos ambientales y sociales del siglo XXI. Los pilares de esta restauración son: 1) fomento de la heterogeneidad espacial, 2) fomento de la diversidad funcional, 3) fomento de la capacidad de recuperación natural.

➤ Objetivos y metodología

En un escenario de rápido cambio global es prioritario establecer planes de actuación proactivos, que se anticipen a los problemas a los que se enfrentarán las formaciones vegetales. Es muy previsible que los incendios sean cada vez más frecuentes si se incrementan las temperaturas y se reducen las precipitaciones. A este hecho hay que añadir el abandono de los aprovechamientos del bosque y el aumento de las actividades recreativas, que contribuyen a aumentar el riesgo de incendios causados, intencionada o accidentalmente, por el ser humano.

El proyecto de restauración que se ha diseñado tras el incendio aprovecha los mecanismos de recuperación naturales, fomentando tanto la heterogeneidad espacial de las actuaciones, como la diversidad específica de las especies introducidas. El objetivo es favorecer el uso múltiple, potenciando un modelo de monte más abierto, con discontinuidades, más heterogéneo, diverso, y resistente frente a posibles catástrofes (plagas, decaimiento forestal, incendios) y con mayor capacidad de adaptación a los avatares climáticos.

En el proyecto se han aplicado diferentes técnicas de restauración para estudiar su efectividad, como la regeneración bajo cubierta de matorral, la regeneración bajo restos de vegetación, y la instalación de núcleos de dispersión como nueva técnica para potenciar la recupera-

ción de las zonas más degradadas tras el incendio. Para la creación de estos nuevos núcleos se han utilizado especies de matorral de crecimiento y reproducción rápida, para que sus semillas se diseminen por el entorno, seleccionándose para este fin a *Rosa canina*, *Crataegus monogyna*, *Prunus ramburii*, *P. spinosa* y *Berberis hispanica*, junto con especies arbóreas (*Quercus* sp. y *Pinus* sp.). También se ha realizado un seguimiento de los núcleos de vegetación leñosa que se ha desarrollado espontáneamente dentro de la zona quemada como consecuencia del hábito rebrotador de algunas especies, y se han realizado plantaciones experimentales aprovechando los matorrales pioneros que ya se han instalado de forma espontánea tras el incendio (fundamentalmente *Adenocarpus decorticans*, *Ulex parviflorus* y *Genista versicolor*), que pueden actuar como plantas nodriza, mejorando la supervivencia de los plantones repoblados. Esta novedosa técnica de restauración ya se ha probado en Sierra Nevada, con resultados muy positivos [6].

Adicionalmente, en un sector de la zona quemada se establecieron parcelas experimentales de tres tratamientos que diferían en el manejo de la madera quemada, siendo éstos la saca realizada de forma tradicional, la no intervención (dejando todo el arbolado en pie, sin actuar) y un tratamiento intermedio en el que se tumbó y tronizó el 90% de los árboles pero se dejó toda la biomasa *in situ*. Desde entonces se han mo-

nitorizado diversas variables relacionadas con la regeneración de la vegetación (supervivencia, crecimiento, daños por herbivoría) o con el funcionamiento del ecosistema (recuperación de la diversidad de especies, secuestro de carbono, descomposición de la madera quemada, etc).



Brinzal de encina creciendo bajo los restos de madera quemada dejados tras el incendio en las parcelas experimentales.

➤ Resultados

La presencia de matorral pionero ha favorecido en general el crecimiento de la mayor parte de las especies introducidas, aunque ha tenido un efecto muy diferente sobre la supervivencia dependiendo de la especie. La orla espinosa formada por aulaga (*U. parviflorus*) y genista (*G. versicolor*) ha facilitado la restauración, mejorando las tasas de supervivencia de todas las especies y reduciendo de manera importante la

herbivoría. Por el contrario, el efecto de la rasca-vieja (*A. decorticans*) sobre la supervivencia del agracejo, majuelo, endrino o encina no ha sido beneficioso (ver Tabla 1).

La supervivencia y crecimiento de los plantones también se han visto afectados por la altitud, siendo mayor en general en cotas altas para *Q. ilex* y *B. hispanica*, mientras que el resto de

las especies se han comportado mejor a cotas bajas.

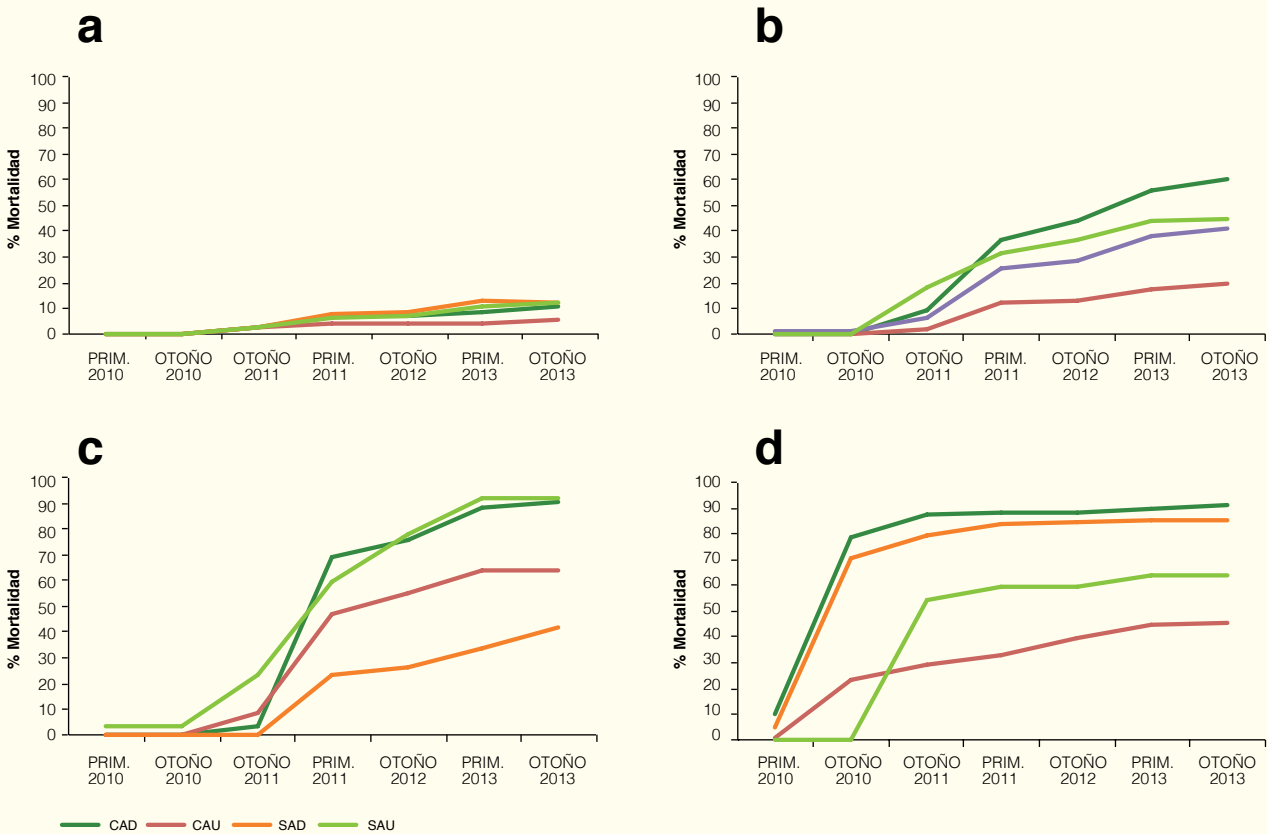
C. monogyna y *R. canina* son las especies que han mostrado una mayor supervivencia. Las especies arbóreas que más han sobrevivido han sido *P. pinaster* en las cotas bajas y *Q. ilex* en cotas altas. En general, se han adaptado mejor las especies arbustivas que las arbóreas.

Tabla 1

SUPERVIVENCIA	Con <i>Adenocarpus</i>	Con <i>Ulex/Genista</i>	Sin <i>Adenocarpus</i>	Sin <i>Ulex</i>
<i>Berberis hispanica</i>	≈	+	+	-
<i>Crataegus monogyna</i>	-	+	+	-
<i>Prunus ramburii</i>	-	+	+	-
<i>Rosa canina</i>	≈	≈	≈	≈
<i>Pinus</i> sp.	≈	+	≈	-
<i>Quercus ilex</i>	-	+	+	-

Efecto del matorral pionero (*Adenocarpus* y *Ulex/Genista*) sobre la supervivencia de las especies introducidas en la restauración. Los signos positivos y negativos se corresponden con porcentajes de supervivencia mayores y menores respectivamente, y estadísticamente significativos en ambos casos, a partir de los análisis de la varianza realizados.

Figura 1



Tasa de mortalidad acumulada de *Rosa canina* (a), *Crataegus monogyna* (b), *Quercus ilex* (c) y *Pinus* sp. (d) en los seguimientos bianuales realizados entre primavera de 2010 y otoño de 2013 para los escenarios con adenocarpus (CAD), con aulaga (CAU), sin adenocarpus (SAD) y sin aulaga (SAU).

➤ Discusión y conclusiones

Se han diseñado una serie de actuaciones de restauración encaminadas a aumentar la diversidad del monte, tanto específica como estructural, mejorando de este modo su capacidad de adaptación frente al cambio climático y los eventos extremos. Quizás lo más novedoso de estas actuaciones sea la combinación de diversos tipos de tratamientos en función de las características ecológicas y la historia de manejo de la zona. Para favorecer la regeneración natural se han realizado plantaciones por bosquetes irregulares en forma y heterogéneos en su composición de especies. Los bosquetes se han combinado con plantaciones mediante núcleos de dispersión con mezcla de especies arbustivas y arbóreas. En general los núcleos han ofrecido mejores resultados de supervivencia y crecimiento que las repoblaciones, aunque pequeñas diferencias existentes en la orientación y en el año de plantación de unos y otros obligan a tomar estos resultados con cautela. En cualquier escenario, las especies arbustivas han arrojado mejores resultados que las arbóreas.

En concreto, las especies que han mostrado un mayor porcentaje de supervivencia han sido la rosa (*R. canina*) y el majuelo (*C. monogyna*), especialmente en cota baja y bajo la presencia de aulaga, aunque han funcionado bien en los cuatro escenarios. El agracejo (*B. hispanica*) y la encina (*Q. ilex*) son los que mejor han respondido en cotas altas en ausencia de matorral. Esta diversidad de respuestas frente a condiciones ecológicas diferentes es la base de la recuperación de una vegetación más resiliente y adaptada a las nuevas condiciones climáticas. Los resultados obtenidos en las parcelas experimentales muestran que los troncos y ramas quemados actúan como estructuras nodriza que reducen la temperatura del suelo y el estrés hídrico de las plantas [7]. La madera quemada también actúa como un importante reservorio de nutrientes que se van incorporando al suelo [8], y la complejidad estructural que generan troncos y ramas esparcidos por el suelo protege a los juveniles de especies leñosas ante los herbívoros ungulados. Esto se traduce en una mayor tasa

de reclutamiento y de crecimiento de brinzales de especies leñosas, ya sean de regeneración natural o de reforestación [9]. Por otra parte, la saca de la madera afecta también al balance de carbono con la atmósfera [10] (ver capítulo 7.1.). La respiración del suelo fue mayor en presencia de restos de madera quemada, probablemente debido a la mayor biomasa microbiana y disponibilidad de nutrientes registrados en el suelo en este escenario [8]. Considerando los resultados obtenidos, no parece justificado asumir la saca como la única opción de manejo post incendio cualesquiera que sean las características de la zona. Existe un amplio gradiente de posibles manejos de la madera quemada entre la saca y la no intervención, que pueden incluir distinto grado de saca, saca por bosquetes, por zonas de distinta sensibilidad ante un factor ambiental particular (riesgo para transeúntes, riesgo de plagas, etc.), manejo de restos gruesos en caso de zonas maderables, etc.



Aspecto de las parcelas experimentales desde el aire un año después del incendio (Septiembre de 2006). Se aprecian las tres parcelas de no intervención (tonalidad más oscura), tres parcelas de apeo y tronzado del 90% de los pies, sin saca (tonalidad intermedia) y tratamiento tradicional (tonalidad más clara e igual al resto de la zona tratada).

8.3. Dinámica poblacional de la procesionaria del pino: respuestas a los cambios en el clima y en el manejo forestal

Hódar, J.A.¹; Aspizua, R.²; Bollullos, C.² y Zamora, R.³

¹ Universidad de Granada ² Agencia de Medio Ambiente y Agua ³ Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía, Universidad de Granada

Resumen

Los datos recopilados en Andalucía evidencian que la procesionaria del pino (*Thaumetopoea pityocampa*) está incrementando e intensificando la frecuencia de sus plagas durante los últimas décadas. Los pinares de Sierra Nevada están situados a una altitud en la que la procesionaria puede verse más favorecida por el incremento de las temperaturas. Por ello planteamos una estrategia de prevención basada en el manejo del hábitat, planificando el desarrollo de formaciones forestales diversas en estructura espacial y composición específica, más resistentes y resilientes frente a las plagas y otros procesos de decaimiento forestal.

➤ Objetivos y metodología

La procesionaria del pino (*Thaumetopoea pityocampa*) ejemplifica el modo en que algunos defoliadores de nuestros bosques se pueden ver favorecidos como consecuencia del calentamiento global [11]. La larva de esta especie se desarrolla durante el invierno, y por tanto, cabe suponer que el incremento de temperaturas tendrá en ella un efecto positivo, acelerando su desarrollo. Para comprobar esta hipótesis, se ha establecido un dispositivo de seguimiento demográfico de la procesionaria en Sierra Nevada, evaluando el nacimiento de las orugas,

la procesión y enterramiento de las mismas, y la emergencia de los adultos. Se han elegido tres localidades de muestreo dentro del P. N. Sierra Nevada, considerando orientación, altitud y especie forestal dominante. En cada una de estas localidades se han establecido tres zonas de muestreo a lo largo del rango altitudinal en el que se distribuye el pinar. El seguimiento de verano comprende desde la aparición del adulto hasta la eclosión de las puestas (julio-septiembre) mediante trampas de feromona para las polillas y seguimiento de 30 puestas en

cada una de las zonas altitudinales de estudio. El seguimiento de invierno comprende desde la salida de las orugas del bolsón (noviembre-diciembre) hasta el final de los enterramientos (marzo-abril), mediante trampeos pie a pie en 30 árboles por zona, y transectos de 1 km de longitud en los que se registra el número de enterramientos encontrados en cada visita. La frecuencia de muestreo es de 2-3 veces en semana.

➤ Resultados

Aunque la defoliación provocada por la procesionaria es visualmente impactante, en realidad sus efectos finales sobre los pinos atacados son limitados, y los pinos generalmente se recuperan bien, siempre que no sufran varias defoliaciones sucesivas. La relación entre las defoliaciones por procesionaria y la temperatura, en particular los inviernos suaves, es conocida de antiguo, por lo que en un contexto de calentamiento global es esperable que esta especie colonice zonas que, en razón de su latitud o altitud, hasta ahora le estaban vedadas. Estas predicciones se han

visto confirmadas en diversos estudios [11-12]. En Sierra Nevada, las capturas con trampas de feromona muestran una clara relación entre las temperaturas medias de la primavera previa y la mediana de la fecha de emergencia de las polillas en esa temporada (Figura 1). Un efecto similar se ha comprobado para la precipitación de la primavera previa. En este sentido, una reducción en la precipitación primaveral, un incremento en la temperatura, o ambas cosas, adelantaría la emergencia de las polillas. Dado que el tiempo transcurrido entre la puesta y la eclosión apenas

varía, y que las larvas recién nacidas son las más sensibles a las condiciones climáticas y a la calidad del alimento disponible, un adelanto de varias semanas del pico de eclosión supone una ventaja importante para las larvas, que podrían comenzar el invierno en un estadio más avanzado de desarrollo y, presumiblemente, en mejores condiciones para superarlo.

Sin embargo, también se ha comprobado que, en parte de su área de distribución, la procesionaria muestra ciclos de infestación de cinco-seis



años, ciclos cuya longitud y periodicidad sugieren una regulación por factores bióticos.

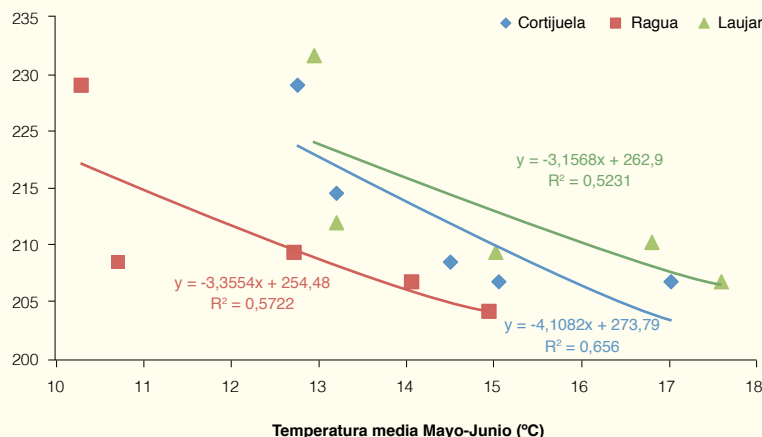
No está, pues, tan claro que sea el clima el único factor capaz de explicar la dinámica poblacional de esta plaga. En conjunto, una hipótesis de trabajo puede ser que los años de NAO (Oscilación Atlántico Norte) invernal negativa, que en nuestra región se corresponden con inviernos suaves y húmedos, desencadenan la explosión poblacional, dándose la máxima incidencia de defoliación uno o dos inviernos más tarde. Tras el pico, el efecto combinado de inviernos más fríos, pinos previamente defoliados, e incremento de las poblaciones naturales de depredadores y parasitoides, retorna la población a niveles crónicos.

Varios depredadores pueden postularse como potenciales controladores de la procesionaria. En Sierra Nevada, los depredadores más habituales de sus puestas son los saltamontes efípigéridos, que en algunos años y zonas pueden consumir más de la mitad de las puestas. En cuanto a los parasitoides que atacan a los huevos, hay un claro patrón en la intensidad de parasitismo: a mayor altitud, menor parasitación. El porcentaje puede variar desde un 50% de huevos parasitados en cotas bajas hasta casi cero por encima de los 2.000 msnm (Figura 2). Aparentemente, mientras que la procesionaria ha conseguido establecerse bien en las cotas más elevadas (es allí donde hay una mejor relación entre variables climáticas y defoliación [13]), no ocurre así con sus parásitos, lo que limitaría su capacidad como controladores en estas cotas donde su concurso es precisamente más necesario.



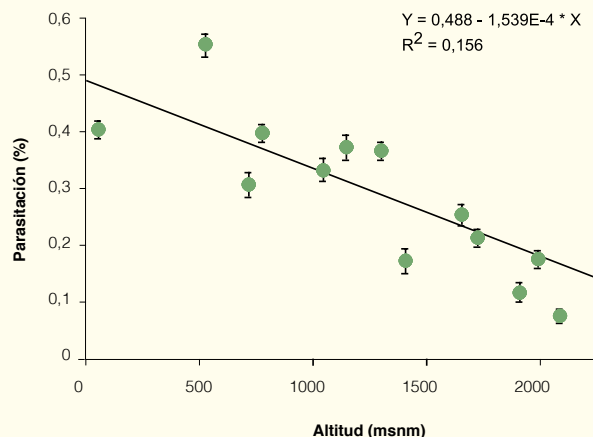
Vista de Trevenque y Trevenquillo desde la subida a Collado Matasverdes, tras la defoliación del invierno de 2010 (arriba) y 5 años después (abajo). En la última, aunque empieza a apreciarse un nuevo pico de defoliación, se ve claramente que los pinos defoliados hace cinco años se recuperaron sin problema

Figura 1



Relación entre la fecha mediana de captura de las polillas en las trampas de feromona de las zonas de estudio y la temperatura media en los dos meses previos de esa misma primavera, para las tres regiones de seguimiento y para los años 2009 a 2013.

Figura 2



Variación en la tasa de parasitación en las puestas de procesionaria a lo largo de varios gradientes altitudinales en la provincia de Granada. Cada punto (media $\pm$ 1 error estándar) representa la tasa promedio de las parcelas a la misma altitud y de los cuatro años de estudio (2008-2011), para un total de 1727 puestas.

➤ Discusión y conclusiones

La principal dificultad para encontrar tendencias poblacionales en un organismo como la procesionaria del pino radica en su dinámica cíclica. Esta especie muestra episodios de plaga alternando con períodos de latencia en los que es apenas detectable, y el ciclo se completa en unos cinco-seis años. La existencia de otros estudios en la región con series más largas [12-13] ayudan a interpretar los datos de Sierra Nevada en un contexto más amplio. Los análisis efectuados indican que la procesionaria se verá claramente beneficiada por el incremento de temperaturas en las cotas medias-altas de Sierra Nevada, ya que allí el clima era hasta ahora el factor más limitante, los depredadores naturales son escasos, y es también la zona en la que se encuentran la mayoría de los pinares del macizo, naturales o repoblados. El método de gestión que se utiliza en Sierra Nevada no está enfocado al control de los episodios de plaga; únicamente

en zonas puntuales y por cuestión de salud pública se realizan tratamientos excepcionales con cañón, aéreos o mediante control manual de bolsones, con la efectividad limitada que confirman los estudios realizados [14].

En el caso específico de la procesionaria, es conocido que mezclar los pinares con otras especies no susceptibles (frondosas, por ejemplo) reduce la intensidad del ataque [15]. Diversificar el bosque añadiendo otras especies vegetales ofrece además recursos alternativos (alimento y otros hospedadores) a los parasitoides de la procesionaria, e introduce hábitats inadecuados para la pupación de las larvas, lo que reduce sus poblaciones. Asimismo, otros depredadores como aves pueden verse favorecidos por un adecuado mosaico de hábitats. Por ejemplo, abrir claros supone en principio un entorno más favorable para la procesionaria, que prefiere los

bordes de rodal para desarrollarse, pero si los claros no están desnudos sino cubiertos por matorral, son entornos inadecuados para la pupación y además pueden favorecer la depredación de las puestas por ortópteros epigigridos.

En este sentido, la disminución de densidad y la diversificación de los pinares repoblados es la recomendación más general que puede darse para la futura gestión de estas masas arboladas. En términos selvícolas, esto supone realizar las labores forestales necesarias para diversificar la masa, fomentando tanto la mezcla de especies arbóreas y arbustivas, como la heterogeneidad espacial de la formación forestal. Al mismo tiempo, es importante mantener el vigor individual del arbolado con espesuras adecuadas que faciliten el abastecimiento hídrico.

8.4. Naturalización de pinares de repoblación: preparando el bosque para el cambio

Aspizua, R.¹; Bonet, F.J.²; Zamora, R.² y López-Onieva, M.R.¹

¹ Agencia de Medio Ambiente y Agua ² Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía, Universidad de Granada

Resumen

Buena parte de las 36.700 ha de pinares de repoblación existentes en el macizo de Sierra Nevada tienen una dinámica sucesional estancada, siendo muy vulnerables frente a las perturbaciones. Por ello es un objetivo prioritario de la gestión el favorecer la evolución de estas formaciones hacia una comunidad forestal que presente una mayor diversidad florística, estructural y funcional. Los estudios realizados hasta la fecha ponen de manifiesto la importancia de las variables ambientales (clima, altitud), la estructura del paisaje (fragmentación del pinar, tamaño, densidad, posición y contacto con las manchas de vegetación autóctona) y de la gestión pasada en la composición, estructura y capacidad de regeneración de los pinares de repoblación. En el marco del Observatorio del Cambio Global de Sierra Nevada se está evaluando la eficacia de varios tipos de tratamientos en masas de diferente tipología mediante una red de parcelas experimentales. Dicho seguimiento nos permite plantear recomendaciones de gestión activa encaminadas a promover la naturalización de las repoblaciones en una amplia gama de condiciones ambientales, dosificando la competencia, favoreciendo las estructuras en mosaico de la vegetación y respetando los individuos con una alto potencial vegetativo y reproductivo. En repoblaciones de densidad intermedia, se recomienda diversificar el dosel y la estructura favoreciendo la regeneración natural de especies leñosas y la existencia de madera muerta. Por último, en zonas alejadas más de 2 km de parches de vegetación autóctona se proponen plantaciones y/o siembras de enriquecimiento con especies adaptadas a los hábitats potenciales según las actuales previsiones de cambio climático.



En la comarca del Marquesado del Zenete se localizan las mayores extensiones de pinares de repoblación de Sierra Nevada.

➤ Objetivos y metodología

El objetivo de este trabajo es profundizar en el conocimiento aplicable a la naturalización de los pinares de repoblación en Sierra Nevada mediante la recopilación de información procedente de experiencias locales. Para ello, se describen algunos aspectos importantes de la estructura y capacidad de regeneración de los pinares de repoblación en función de distintas variables ambientales (clima, altitud), de estructura del paisaje (fragmentación del pinar, tamaño/densidad de las manchas y contacto con otras manchas de vegetación autóctona) y de la gestión en el pasado. Esto se complementa con la evaluación de la eficacia de diferentes tipos de tratamientos de naturalización de pinares a través de una red de parcelas permanentes de seguimiento distribuidas por los pinares más representativos de macizo. Esta metodología puede consultarse en [23].

El Parque Nacional y Natural de Sierra Nevada cuenta con más de 52.000 ha de formaciones arboladas densas, de las cuales 36.700 son pinares de repoblación, en su mayoría plantados entre los años 60 y 70 sobre zonas desarboladas sometidas a fuertes procesos erosivos.

Aunque gran parte de la superficie de los pinares debía haber constituido una etapa de transición hacia formaciones de frondosas o mezcla de frondosas y pinos, la falta de tratamientos selvícolas en edades intermedias ha supuesto que la evolución de una parte importante de estas masas se encuentre prácticamente estancada. Se trata de pinares homogéneos, a menudo monoespecíficos, de densidad excesiva para su edad y donde los árboles no han podido desarrollar su vuelo ni su sistema radical de manera adecuada debido a un exceso de competencia por agua, luz y nutrientes. En muchos casos no existe sotobosque de especies leñosas o éste es muy pobre, siendo en general muy baja la diversidad tanto florística como estructural. Todo ello implica que estas masas se encuentren sometidas a un continuo estrés fisiológico que las hace muy vulnerables frente a perturbaciones de todo tipo (sequías, plagas, etc.).

La estrategia para mejorar su estado pasa por favorecer la evolución hacia una etapa de la sucesión vegetal más acorde con las condiciones ecológicas actuales y futuras, con una mayor diversidad florística, estructural (diversos tipos

de vegetación formando un paisaje en mosaico) y funcional que mejore la resiliencia de estos sistemas.

Una de las cuestiones clave para fomentar la naturalización de los pinares es identificar los lugares más adecuados en los que realizar los tratamientos, lo que requiere un conocimiento profundo del funcionamiento de los pinares de repoblación. Otro aspecto clave es evaluar los resultados de las actuaciones realizadas, para conocer con detalle el efecto de los distintos tratamientos sobre la vegetación según las características de la formación de partida.

En este capítulo se analiza el efecto en la regeneración y diversidad florística bajo el pinar de los gradientes bióticos y abióticos, de la configuración espacial del pinar y, por último, de los usos del suelo en el pasado. Los resultados mostrados aquí se basan en un inventario forestal con casi 600 parcelas realizado en Sierra Nevada en 2004 del que se han derivado diversas publicaciones ([16-17], ver capítulo 3.6), así como en otros muestreos específicos realizados por los autores.

➤ Resultados

El análisis de diversas fuentes de información (el inventario forestal realizado en 2004, los resultados derivados del análisis de estos datos publicados en revistas científicas y la puesta en marcha de parcelas experimentales con sus seguimientos asociados) ofrece información muy valiosa sobre la estructura y funcionamiento de los pinares de repoblación. Estos resultados se pueden agregar atendiendo a los siguientes aspectos estructurales y funcionales:

Gradientes en factores abióticos:

- Altitud y regeneración: Las plantaciones situadas a altitudes bajas (≈ 1.300 msnm) o moderadas (≈ 1.700 msnm) mostraron un banco de reclutas diverso y abundante dominado por especies del género *Quercus*, mientras que las plantaciones más altas (≈ 2.100 msnm) mostraron un banco de reclutas monoespecífico de pino silvestre (*Pinus sylvestris*) [16].



Vista de un pinar de repoblación antes y después de los tratamientos de naturalización en la Cortijuela (Monachil).

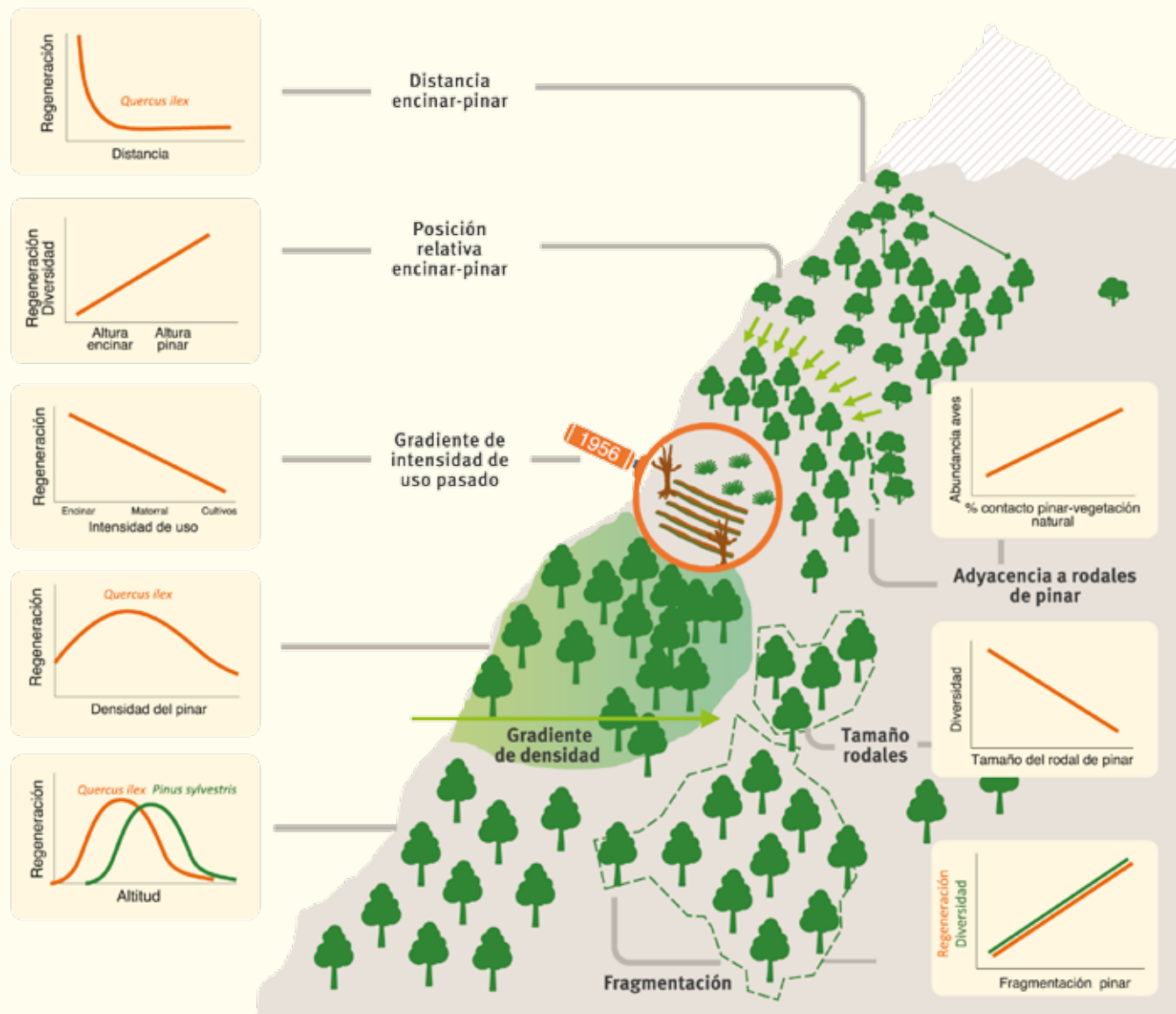
- Distancia a manchas de encina y regeneración de encina bajo el pinar: se constató una disminución exponencial en el reclutamiento de encina al aumentar la distancia al encinar más cercano, disminuyendo la regeneración al 50% a partir de los 250 m y hasta el 80% a partir de 1 km (ver Figura 1).

Estructura del pinar y usos del suelo:

- Densidad del pinar y regeneración: la regeneración fue nula por encima de los 1.500 pinos/ha, mientras que a densidades moderadas (500-1.000 pinos/ha) se constató mayor regeneración, tanto de pino como de otras especies, en comparación con doseles arbóreos abiertos. Sólo el pino carrasco

(*Pinus halepensis*), registró las mayores densidades de regeneración a valores muy bajos de densidad del pinar (0-100 pinos/ha), mientras que la mayor abundancia de regenerado de encina se produjo entre 1.100 y 1.300 pinos/ha, coherente con la necesidad de sombra de esta especie en sus primeras edades [16].

Figura 1



Resumen esquemático de los principales resultados obtenidos en relación a la naturalización de pinares. Se muestra el papel de los factores abióticos (altitud), y bióticos: densidad de los pinares, fragmentación y tamaño de los rodales de pinar, posición relativa de las manchas donadoras de bellotas, distancia fuente-sumidero, adyacencia de vegetación natural a los pinares y efecto de los usos del suelo en el pasado.

- Tamaño de los parches de pinar y diversidad florística: se observó mayor diversidad florística a medida que disminuía el tamaño de los parches de pinar estudiados [17].
- Tipo de vegetación adyacente al pinar: cuanto mayor es el porcentaje de contacto de los pinares de repoblación con parches de vegetación natural, más abundantes son las aves dispersantes en el pinar, así como la dispersión de semillas de plantas zoócoras en su interior [18].
- Uso del suelo en el pasado: la probabilidad de encontrar regeneración de encina en el suelo es inversamente proporcional a la intensidad de manejo en el uso del suelo en el pasado, siendo progresivamente mayor en pastos, cultivos, matorral de media montaña y formaciones del género *Quercus* (ver ficha 3.6).

➤ Discusión y conclusiones

Los diversos gradientes ecológicos de la montaña mediterránea condicionan enormemente las dinámicas de regeneración en las plantaciones de pinos, que deben entenderse (y gestionarse) como sistemas dinámicos donde las trayectorias sucesionales y los niveles de diversidad están determinados por condicionantes abióticos, balances complejos de interacciones de competencia y facilitación, la configuración espacial de las fuentes de semilla natural y las características y temperamento de las especies [16].

En los estudios realizados en Sierra Nevada, se ha demostrado que la naturalización de pinares de repoblación depende tanto de la historia del rodal (que condiciona la disponibilidad del legado de usos del suelo) como de las características ecológicas actuales (distancia a fuente de semillas de otras especies, densidad del pinar y tamaño, densidad, fragmentación y porcentaje de contacto con vegetación natural del parche de pinar). Para estudiar el efecto de estos gradientes bióticos y abióticos en la respuesta de las masas a los diferentes tratamientos se ha establecido una red de parcelas permanentes de seguimiento en Sierra Nevada que permitirá evaluar dentro de unos años qué actuaciones son más eficaces en cada tipo de masa, considerando su historia previa de uso y su contexto ecológico actual, para la consecución de los objetivos buscados.

Teniendo en cuenta los resultados descritos, se incluyen aquí una serie de recomendaciones de gestión para fomentar la naturalización en repoblaciones de características similares a las estudiadas en Sierra Nevada: origen artificial, mediana edad (40-60 años), con regeneración escasa o nula, homogeneidad en el estrato arbóreo, estrato arbustivo escaso o inexistente y espesura excesiva. Se propone:

I. En plantaciones de densidad excesiva (>1.500 pies/ha): Urge realizar una gestión activa enfocada a dosificar la competencia, al mismo tiempo que permita la entrada de luz, semillas y dispersantes. Para ello:

- Aplicar claras de diferentes intensidades de corta por bosquetes para favorecer el parcheado de la vegetación: desde pequeños claros cuyo tamaño dependerá de la ecología de la especie que se quiera favorecer, hasta zonas sin aclarar, pasando por zonas aclaradas con diferentes intensidades. Además de variar el número de pies a cortar en los diferentes bosquetes, puntualmente también se pueden aplicar claras altas (cortando pies de diámetros mayores) para favorecer perturbaciones naturales posteriores y dinámicas de instalación de matorral, siempre con la precaución de no favorecer en exceso el matorral colonizador heliófilo, lo que implicaría una dinámica sucesional regresiva y aumentaría el riesgo de incendios.
- Respetar tanto a los individuos senescentes, secos, caídos como a los que muestran un alto potencial vegetativo y reproductivo. Respetar también los posibles pies existentes de otras especies.

II. En plantaciones de densidad intermedia (500-1.000 pies/ha): Realizar tratamientos de diversificación del dosel para conseguir masas mixtas e irregulares, ajustando la intensidad de la clara a las condiciones ecológicas del rodal. Para ello:

- Favorecer la regeneración natural mediante cortas de regeneración de entresaca por bosquetes.
- Si existe regeneración de especies más umbrófilas, se favorecerá su liberación de manera proporcional al tamaño de los

reclutas establecidos, respetando su temperamento, mediante un plan de claras de rotación corta y peso moderado-débil.

- Obtener árboles de gran porte a partir de una selección de los dominantes y la liberación del espacio de su entorno (unos 100-150 árboles/ha, de los cuales unos 50 se mantendrán sin podar) [19].

III. Favorecer la existencia de madera muerta (máximo el 5% de los pies), tal como recomiendan diversos estudios [19].

IV. En plantaciones de densidad baja o moderada se realizará en principio una gestión pasiva, excepto para los casos contemplados en el punto V.

V. Se buscará maximizar la superficie de contacto del pinar con los parches de vegetación natural, ya sea arbolada o de matorral, que ha demostrado influir positivamente en la dispersión zoócora [18].

VI. Donde se estime que el proceso natural de reclutamiento va a ser muy lento, por excesiva lejanía a las fuentes naturales de semillas o por un uso intensivo del suelo en el pasado que haya eliminado todos los restos de vegetación natural, será preciso recurrir a plantaciones o siembras de enriquecimiento. Se emplearán para ello especies adaptadas a los hábitats potenciales según las previsiones de cambio climático. Si es necesario realizar claras previamente, éstas se harán cortando los pies de menor diámetro.



Parcelas de evaluación de las actuaciones de naturalización en Sierra Nevada

Para estudiar el efecto de los gradientes bióticos y abióticos en la respuesta a las claras, y poder valorar así qué intensidad es más adecuada para la naturalización de los pinares en cada emplazamiento, se ha establecido una red de parcelas permanentes de seguimiento en Sierra Nevada.

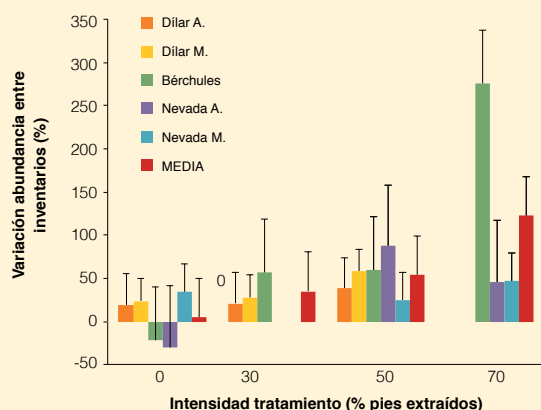
En cinco zonas diferentes en cuanto a exposición, altitud, tipo de suelo y especie principal de masa, se han ensayado claras de diferente intensidad en base al porcentaje de pies extraídos: intermedia (30%), fuerte (50%), muy fuerte (70%) y sin tratamiento (parcelas control), con tres réplicas por tratamiento en cada zona. Cada parcela (50 x 50 m), combina un inventario dasométrico con un inventario de especies leñosas. Con esta red de parcelas, se han sentado las bases para evaluar el efecto de la intensidad de los tratamientos realizados en la evolución de las masas. Se estudia la supervivencia, crecimiento y regeneración de la vegetación existente en el rodal, junto a variaciones en la diversidad florística y estructural del mismo. Se presta especial atención al estableci-

miento y desarrollo de vegetación leñosa arbustiva y arbórea, por su importante papel como facilitador de la dinámica sucesional del ecosistema.

El poco tiempo transcurrido desde su instalación (2-3 años según zonas) no permite aún obtener resultados concluyentes, aunque ya puede apreciarse que, a medida que aumenta la intensidad de la clara, aumenta la abundancia de individuos de matorral en el conjunto de las parcelas (Figura 2). Además, en Nevada se ha podido constatar un aumento importante de la cobertura de matorral (Figura 3). También se observa un aumento en la riqueza tras el tratamiento utilizando imágenes estereoscópicas hemisféricas. En concreto, en la zona de Dílar ha habido una mayor respuesta de la masa cuando se han aplicado claras moderadas (Figura 4) [20].

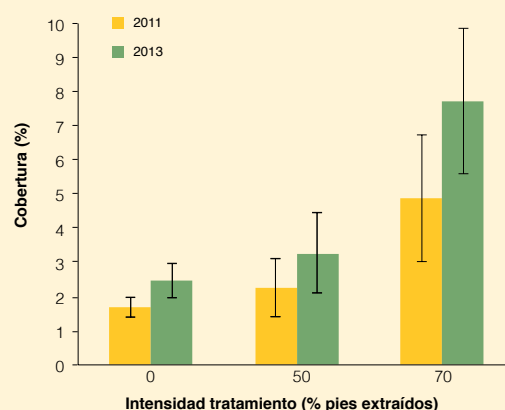
En cualquier caso, es necesario repetir el seguimiento en el futuro para valorar la evolución de los pinares.

Figura 2



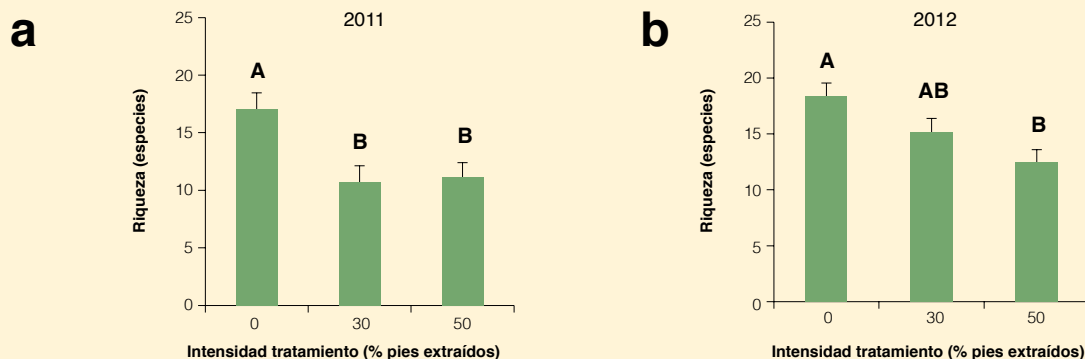
Variación (%) de la abundancia de individuos de matorral entre inventarios consecutivos, por zona de actuación y escenario de tratamiento. Las barras representan el promedio de esta variación para las tres réplicas de parcelas correspondientes a cada escenario en cada localidad y las barras de error representan la desviación estándar positiva promedio para cada localidad.

Figura 3



Cobertura de matorral (%) en las parcelas de Nevada en el año 2011 (amarillo), coincidiendo con la clara, y en el año 2013 (verde). Se engloban los resultados de las tres réplicas y de las dos zonas a diferente altitud. Las barras de error representan la desviación estándar.

Figura 4



Índice de riqueza en número de especies según tratamiento (peso de clara de 0, 30 y 50%) promediado para las zonas Dílar Alto y Dílar Medio en el año 2011 (a) y 2012 (b). Las columnas presentan valores medios y las barras los errores estándar. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas ($P < 0.05$). Modificado de [20].

8.5. Impactos del cambio global en los robledales de Sierra Nevada: algunas evidencias y recomendaciones de manejo

Bonet, F.J.¹ ; Pérez-Luque, A.J.¹ ; Aspizua, R.² ; Muñoz, J. M.² ; Zamora, R.¹

¹Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía, Universidad de Granada ²Agencia de Medio Ambiente y Agua

Resumen

Los robledales (*Quercus pyrenaica*) se encuentran en Sierra Nevada en el límite de su distribución natural. Para su supervivencia requieren veranos húmedos que no son frecuentes en el sur de la Península Ibérica. Además han sufrido una intensa historia de manejo en los últimos siglos (carboneos, talas, podas, abandono de usos tradicionales, etc.). Por último también están afectados por el cambio climático. Esta situación hace que los robledales de Sierra Nevada estén al límite de su capacidad de automantenimiento, lo que también compromete su expansión a zonas adecuadas adyacentes (cultivos abandonados y pinares de repoblación). Los estudios realizados hasta la fecha muestran la importancia de los gradientes altitudinales en el funcionamiento del robledal. Los situados en cotas bajas tienen mayores problemas de reproducción sexual. Además, se observan notables diferencias en el comportamiento en función de la localidad. Así, los robledales de la zona noroeste producen menos bellota que los de la zona sur. También se ha evaluado la capacidad del robledal de recolonizar pinares de repoblación y cultivos. Los resultados muestran que la localidad también es importante en este caso: la regeneración parece más intensa bajo los pinares de la zona norte, mientras que en el sur hay más reclutas invadiendo cultivos abandonados. Estos resultados deben incorporarse en los planes de gestión forestal.

➤ Objetivos y metodología

El objetivo de este trabajo es recopilar las principales evidencias del impacto del cambio global en la estructura y funcionamiento de los robledales de *Quercus pyrenaica* de Sierra Nevada. Por otro lado, se proponen recomendaciones de manejo basadas en dichas evidencias.

Los robledales de Sierra Nevada presentan un alto grado de singularidad en términos de composición de especies. Se han identificado tres grupos homogéneos de acuerdo a sus condiciones ambientales y a su composición específica (Figura 1a). En este sentido se observan diferencias importantes en el funcionamiento y estructura de los robledales de la cara norte y de la cara sur.

Por otro lado, esta formación ha sido intensamente modificada a lo largo de la historia, fundamentalmente por la obtención de leñas en monte bajo y, menos frecuentemente, adhesionado para el uso ganadero. Esto ha condicionado enormemente su distribución en la actualidad, ocupando unas 3.500 ha en Sierra Nevada [25]. Los robledales nevadenses muestran una notable falta de vigor vegetativo, escasa

fructificación y predominio de la reproducción asexual. Esta situación se ha atribuido al agotamiento de las cepas, aunque estudios recientes demuestran que los robledales nevadenses muestran una considerable diversidad genética [21]. Además de los problemas anteriores, es importante destacar el importante impacto potencial que tendrá el cambio climático sobre estas formaciones. Los importantes requerimientos hídricos del roble en verano hacen que se pueda considerar una especie vulnerable. Las simulaciones de cambio climático predicen una significativa reducción de su hábitat potencialmente ocupable [22]. Por todo ello, es fundamental desarrollar procedimientos de gestión de estas formaciones que estén basados en la mejor evidencia científica disponible. De esta manera se conseguirán masas con una estructura adecuada que asegure el relevo generacional.

En este sentido, tanto las disposiciones legales vigentes (Plan Forestal de Andalucía, Plan Forestal de España, etc.), como las directrices de gestión del Espacio Natural de Sierra Nevada, establecen dos objetivos básicos para el manejo de estas formaciones:

1. Mejorar la estructura y funcionamiento de los robledales de Sierra Nevada. Este objetivo está relacionado con los problemas provocados por la actividad humana al intervenir de manera muy intensa dentro de los bosques de *Quercus pyrenaica*: resalveos, carboneo, etc.
2. Mejorar su capacidad de expansión a otros lugares potencialmente ocupables por el rebollo. Se trata de fomentar la recolonización de cultivos abandonados o pinares de repoblación y el posible ascenso altitudinal.

La metodología seguida en este trabajo se basa en el análisis de diversas fuentes de datos diferentes recopiladas o generadas por el Observatorio del Cambio Global de Sierra Nevada durante los últimos 6 años. La mayor parte de los datos se han tomado en poblaciones que representan los tres grupos de robledales previamente identificados. La Tabla 1 muestra estas fuentes de información.



Tabla 1

Nombre	Proyecto al que pertenece	Variables de interés para este trabajo	Rango temporal
Evaluación de la gestión forestal en pinares de repoblación	Programa de Seguimiento del Cambio Global de Sierra Nevada	- Diversidad en los pinares de repoblación. - Regeneración de roble tras diferentes intensidades de clara del pinar	2011-2015
Fenología de floración de robledal		- Producción inicial de flores - Éxito de cuajado - Producción de bellota	
Seguimiento de aves dispersantes		Abundancia de aves dispersantes	
Seguimiento de poblaciones ungulados (Cabra montés y jabalí)		Densidad de individuos	1960-2015
Seguimiento de comunidades vegetales: bosques autóctonos y matorrales de media y alta montaña		Diversidad y Riqueza de especies	2011-2014
Colonización de cultivos y migración altitudinal	MIGRAME (Migración Altitudinal y Colonización de hábitats degradados en montañas mediterráneas. Proyecto Excelencia Consejería Innovación, Junta Andalucía	- Distribución espacial y abundancia de reclutas en los cultivos abandonados, en el límite del bosque y en las repoblaciones - Caracterización de la estructura (clases de edad de los reclutas) y evaluación de daños por herbivoría - Comportamiento y abundancia de aves dispersantes - Reconstrucción histórica de la distribución del robledal en Sierra Nevada	2011-2016
Caracterización de daños en masas de frondosas por defoliadores en Sierra Nevada	Plan de seguimiento de daños en masas forestales de Parques Nacionales. Organismo Autónomo de Parques Nacionales	Incidencia del complejo defoliador sobre las poblaciones de roble en Sierra Nevada	1992-2015

Relación de fuentes de información utilizadas para la elaboración del capítulo.

➤ Resultados

El análisis de la información existente permite identificar una serie de problemas que afectan al funcionamiento y a la estructura de los bosques de *Quercus pyrenaica* en Sierra Nevada.

Problemas de regeneración del robledal

Los resultados del seguimiento de la producción de flores femeninas revelan diferencias en la producción entre las distintas poblaciones de robledal, siendo mayores los valores de producción en Cañar (sur) que en Camarate y San Juan (noroeste). Asimismo, se han observado diferencias en la producción entre cotas altas

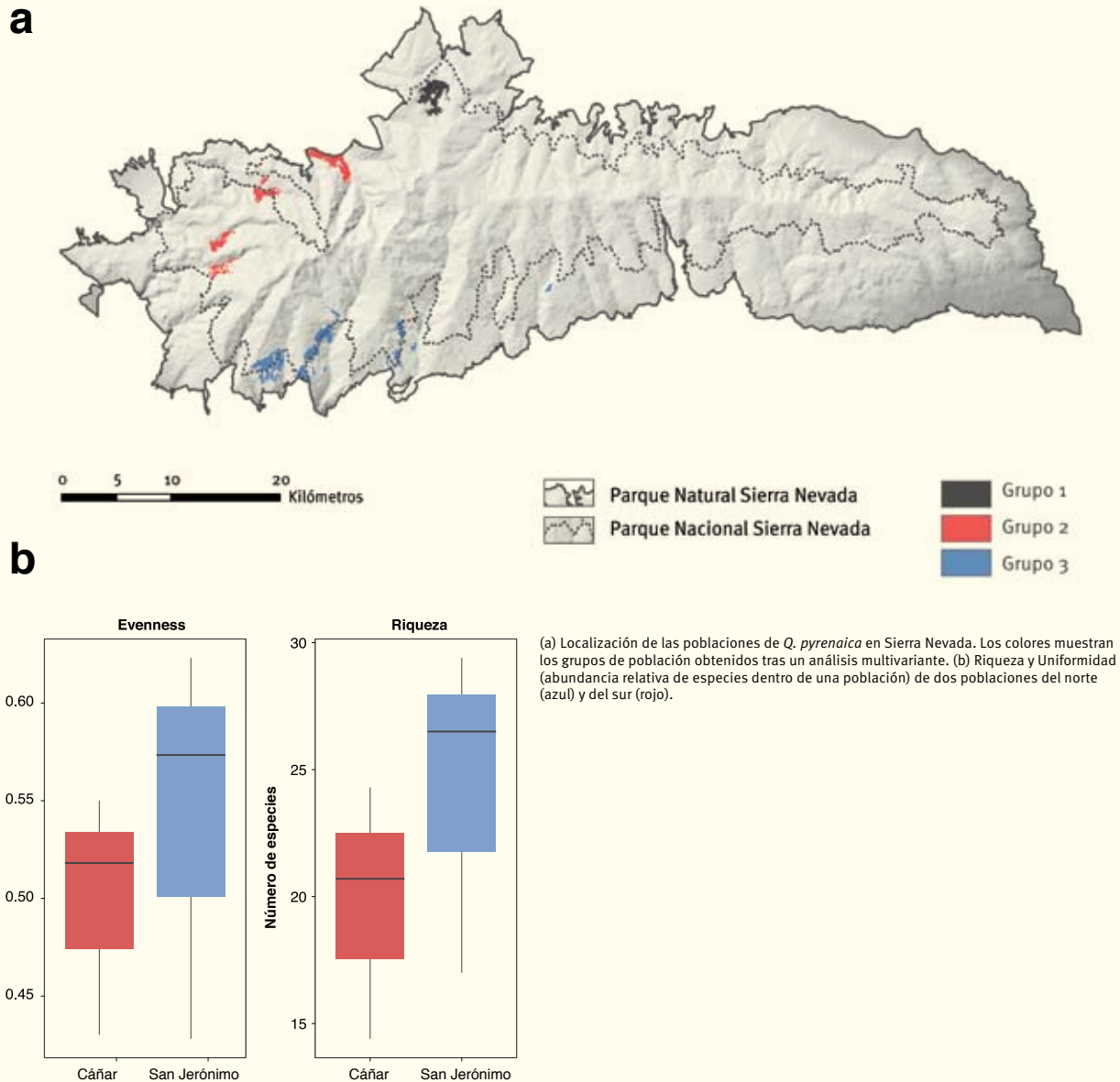
y cotas bajas en todas las poblaciones, siendo significativamente menores las producciones en cotas bajas. Por otro lado la producción final de bellota mostró un patrón similar, con diferencias entre las poblaciones, siendo mayor la producción en Cañar y menor en San Juan. Igualmente, se encontraron mayores producciones de bellota en las cotas altas que en las cotas bajas.

Se constata una disminución poblacional en las últimas décadas de las poblaciones de arrendajo (*Garrulus glandarius*), el principal dispersor de bellotas de esta especie. En los últimos 30 años la densidad de este ave dispersante ha pasado

de 6,6 ind/10 ha en los años 80 a 1,25 ind/10 ha en la actualidad (ver Ficha 5.4) [24]. La principal causa de este cambio puede ser la densificación de los robledales observada en las últimas décadas como consecuencia del abandono de los cultivos de montaña. Por otro lado, las densidades de arrendajo no muestran diferencias significativas entre las poblaciones del noroeste y las del sur (datos de 2007 a 2013).

Además de las limitaciones en la producción de flores y bellotas, las poblaciones de roble melojo sufren una considerable mortalidad de plántulas y juveniles en Sierra Nevada, debido fundamen-

Figura 1



talmente a la sequía estival y a los daños por la herbivoría causada por los ungulados. Por último también se ha detectado un aumento puntual en algunos años en la incidencia del complejo defoliador de *Quercus* en las masas de Sierra Nevada. Este aumento en las defoliaciones podría tener efecto en la producción de bellota de los robles.

Limitaciones para la expansión del robledal

Las limitaciones señaladas anteriormente reducen la capacidad de expansión de los robledales. Se han realizado estudios que evalúan la capacidad del roble de colonizar tanto pinares de repoblación adyacentes como cultivos abandonados.

La alta densidad de los pinares de repoblación en Sierra Nevada dificulta su colonización por el roble. Los tratamientos selvícolas de dosificación de la competencia (claras y clareos) facilitan este proceso. Durante 2011-2012 se han realizado tratamientos experimentales para evaluar el efecto facilitador de claras de distintas intensidades sobre la regeneración del robledal.

La dinámica interna del robledal es demasiado lenta para que, transcurridos solo dos años, se observe un efecto claro sobre la regeneración bajo el pinar. Sin embargo, sí se observa mayor regeneración en las poblaciones del noroeste ($2,75 \pm 0,29$ individuos/25 m²) que en las del sur ($1,24 \pm 0,19$ individuos/25 m²). Además, parece que la intensidad del tratamiento tiene efectos diferentes en función de la orientación del robledal. También es interesante caracterizar la diversidad de los pinares potencialmente colonizables por el roble. En este sentido, se observa que las repoblaciones que rodean a las poblaciones del noroeste tiene mayor diversidad que las del sur.

Por otro lado, el abandono de los cultivos tradicionales que ha ocurrido en los últimos 50 años pone a disposición de los robledales nuevos terrenos que colonizar. Las dificultades naturales para que esto ocurra aumentan debido a la sequía estival y al exceso de herbivoría aún existente en muchas zonas. Este proceso de recolonización de cultivos abandonados se expresa de manera diferente en los distintos tipos de robledales. En Cáñar (sur) hay mayor reclutamiento que en San Juan (norte).



Regeneración de *Q. pyrenaica* bajo pinar de repoblación.

➤ Discusión y conclusiones

La distribución de los robledales de Sierra Nevada y su grado de conservación están condicionados tanto por variables biofísicas que se expresan en la actualidad (orientación, clima, disponibilidad hídrica, etc.), como por la dinámica de cambios de uso del suelo en las últimas décadas (uso intensivo y posterior abandono). Además, el cambio climático también está condicionando la dinámica de estas formaciones. La combinación de estos factores explican la situación actual de los robledales en Sierra Nevada. Los resultados obtenidos muestran que hay diferencias en la producción de flores y bellotas entre las poblaciones del norte (menor) y las del sur (mayor). También se observan diferencias en la capacidad de reproducción sexual entre cotas altas (mayor) y bajas (menor). Por otro lado, la capacidad de expansión del robledal también está condicionada por la orientación. Los resultados preliminares obtenidos tras aclarar pinares contiguos a robledales muestran una mayor regeneración de roble en el noroeste que en el sur. Por último, la colonización de

cultivos abandonados parece estar ocurriendo con más intensidad en el sur que en el noroeste (posiblemente debido a la mayor incidencia de herbivoría aquí).

Las diferencias señaladas anteriormente ponen de manifiesto una respuesta diferencial de los robledales tanto frente a los factores climáticos (que cambian en gradientes altitudinales y geográficos) como frente a los distintos tipos de uso del suelo (que cambian puntualmente a escala local). Estos resultados muestran también el papel de Sierra Nevada como laboratorio natural para estudiar los impactos del cambio global: Las cotas bajas parecen estar más afectadas por el clima más seco y cálido, mostrando un escenario que podría ocurrir en cotas más altas en las próximas décadas. Asimismo, las diferencias observadas en el funcionamiento de las poblaciones de distintas orientaciones reflejan la plasticidad ecológica de estos sistemas forestales frente a la combinación de variables biofísicas y de uso del suelo.

Otros resultados preliminares muestran cambios en el funcionamiento del ecosistema que no parecen relacionados con la orientación ni con la altitud. El proceso de densificación de los robledales tras el abandono de los usos tradicionales (ver ficha 3.3), el descenso en las poblaciones de arrendajo o el aumento en la incidencia de plagas de defoliadores, son ejemplos de estos cambios.

Esta situación pone de manifiesto los importantes problemas de regeneración sexual y de expansión que presentan los robledales de Sierra Nevada en la actualidad, problemas que deberán ser abordados mediante el diseño de protocolos de gestión adaptativa en los que se evalúen de manera continua los resultados obtenidos.

Teniendo en cuenta estos resultados, se incluyen una serie de recomendaciones de gestión para fomentar la capacidad de adaptación de los robledales frente al cambio global:

Actuaciones para mejorar la capacidad de reproducción sexual del robledal:

- Reforzar la instalación de cajas nido para minimizar el impacto de defoliadores. Las aves insectívoras ejercen un importante papel de control de las poblaciones de insectos defoliadores. La instalación de cajas nido podría contribuir a minimizar el impacto de estas plagas en los robledales.
- Mantener el plan de manejo del jabalí. Éste ha conseguido estabilizar las poblaciones de este ungulado. Esto tendrá previsiblemente un efecto positivo en la tasa de reclutamiento en los robledales nevadenses.
- Evaluación del efecto de las acequias tradicionales sobre los robledales. Estos canales de agua son potencialmente útiles para ayudar a los robles a superar los veranos secos de Sierra Nevada, ya

que contribuyen a humedecer el suelo. Su papel será más importante teniendo en cuenta las previsiones de cambio climático. Por ello es importante evaluar el papel de estas infraestructuras y su impacto sobre el crecimiento y regeneración del robledal.

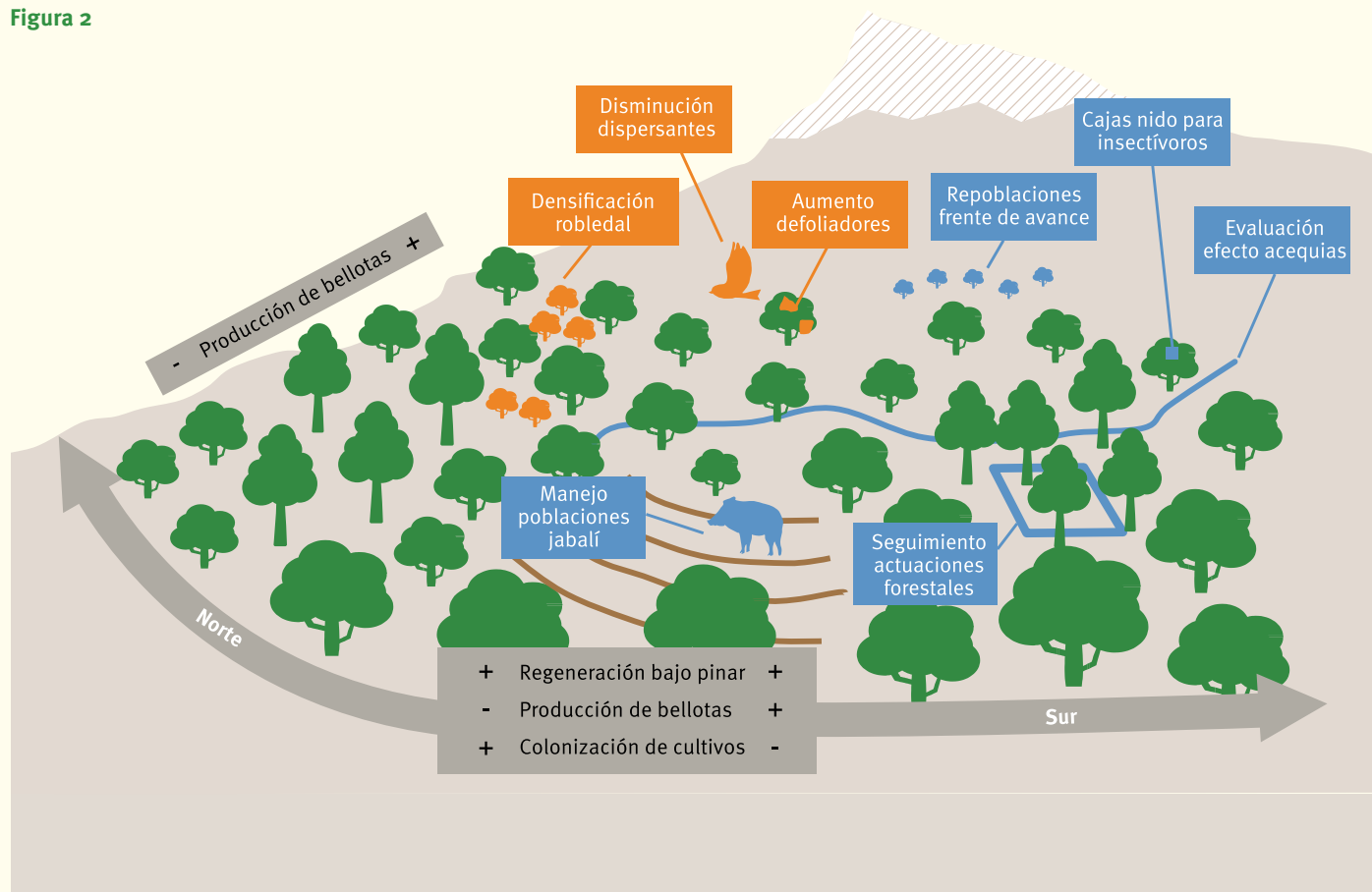
Mejora en la capacidad de expansión del robledal:

- Caracterización de las poblaciones de especies dispersantes. La dispersión y establecimiento en hábitats adecuados es uno de los factores limitantes clave para la expansión del robledal. Por ello es fundamental conocer el estado de las poblaciones de arrendajo y de roedores, que son los principales dispersantes de sus bellotas.
- Repoblaciones en lugares aptos según las previsiones de cambio climático. Las

predicciones climáticas indican que habrá un ascenso altitudinal de esta especie en el futuro. Para contribuir a ese proceso se propone la repoblación con roble en el límite superior del árbol de las poblaciones existentes. De esta manera se reforzará el “frente de avance” de esta especie.

- Mantenimiento del seguimiento de actuaciones forestales en pinares de repoblación adyacentes a robledales. Es importante mejorar el conocimiento existente del proceso de colonización y espaldamiento de los robles en los pinares de repoblación. Para ello es necesario mantener el seguimiento de las claras experimentales realizadas en pinares de repoblación con distintas intensidades y en distintas orientaciones.

Figura 2



Esquema que muestra los principales impactos del cambio global sobre los robledales de Sierra Nevada (naranja), así como una serie de propuestas de manejo de este ecosistema (azul).

Evaluación de la gestión de pinares con regeneración de roble (*Q. pyrenaica*) para favorecer la evolución hacia un bosque mixto más resiliente

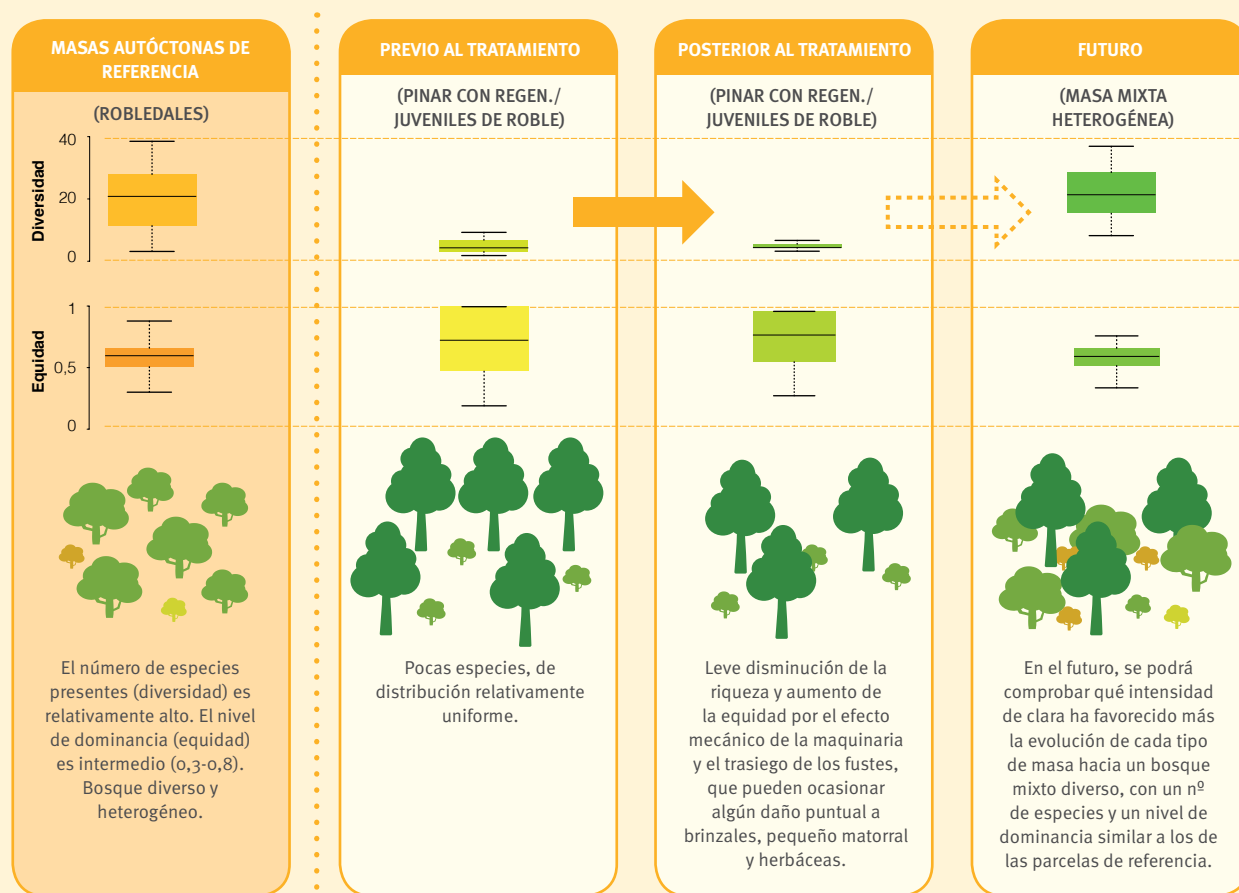
Para facilitar la expansión de los robledales de Sierra Nevada y buscando un modelo de bosque dinámico y resiliente, se han realizado una serie de actuaciones en pinares de repoblación de pino silvestre (*Pinus sylvestris*) cercanos a robledales (*Quercus pyrenaica*) y que se encuentran en una primera etapa de evolución hacia una masa mixta de pino y roble. Al disminuir la densidad de la plantación se reduce la competencia por luz, agua y nutrientes y se permite el desarrollo de robles y otras especies leñosas, arbóreas y arbustivas. Se favorece, de este modo, un aumento de la diversidad florística, estructural y, en definitiva, funcional del ecosistema.

Para evaluar esta gestión, desde el Programa de Seguimiento de Cambio Global de Sierra Nevada se han establecido parcelas de seguimiento en dos localidades situadas en ambas vertientes de Sierra Nevada. En ambas coinciden dos circunstancias: (1) la existencia de un pinar relativamente denso de pino silvestre con abundante regeneración o brinzales de roble y (2) la proximidad de un robledal cercano que funciona como fuente de semilla y que

se ha tomado como referencia. Para estas masas autóctonas se cuenta con datos de riqueza, nivel de cobertura y frecuencia de sus especies vegetales procedentes de otro seguimiento realizado con idéntica metodología.

En cada localidad se han establecido varios tratamientos con distinto porcentaje de clara, delimitándose 3 parcelas de seguimiento para cada uno de ellos. En ellas se ha estudiado la regeneración o recolonización de especies arbóreas o arbustivas y la presencia de herbáceas. Los inventarios se realizaron inmediatamente antes de las actuaciones forestales y se repitieron un año después. Los detalles metodológicos se pueden consultar en [23].

El seguimiento nos permite conocer la evolución del bosque a partir de los diferentes tratamientos llevados a cabo. Con el paso del tiempo, repitiendo los inventarios, será posible caracterizar qué actuaciones han contribuido en mayor medida a la consecución de los objetivos buscados partiendo de la situación inicial en cada tipo de masa.



Comparativa simplificada, mediante diagramas de cajas, de la diversidad de especies medida a través de dos componentes: la riqueza específica (nº de especies de la comunidad) y la equidad (similitud en la abundancia relativa de las especies). El valor 1 de equidad indica una distribución uniforme de los individuos.



Ejemplar de roble (*Quercus pyrenaica*) en la finca pública del Camarate (Lugros, Granada).

8.6. Análisis de la susceptibilidad frente a inestabilidades de ladera en el Parque Nacional de Sierra Nevada

Azañón Hernández, J.M. y Pérez-Peña, J.V.

Universidad de Granada

Resumen

En este estudio se analiza el peso que tienen una serie de variables dependientes del clima, la topografía, la vegetación y la geología en el condicionamiento y desencadenamiento de inestabilidades de ladera en el Parque Nacional de Sierra Nevada. Se ha realizado un análisis estadístico multivariante con el fin de obtener las variables que expliquen mejor las varianzas de las distribuciones para cada tipología de inestabilidad. Para este análisis, además de las variables típicas como las derivadas de la topografía, la geología y los usos del suelo, se han incorporado variables no evaluadas anteriormente. Estas variables son el índice de vegetación normalizado (NDVI), los ciclos de fusión y duración de la nieve y el umbral de escorrentía (Po). Se han diferenciado 3 tipologías de movimientos de ladera por separado; deslizamientos, flujos, y desprendimientos, analizando el peso de las variables analizadas en cada una de estas tipologías. Aunque las tres nuevas variables analizadas son críticas para el análisis de la susceptibilidad, el NDVI es la que muestra un mayor peso, condicionando especialmente la distribución de los deslizamientos. El aumento de la torrencialidad, asociada al cambio climático, conllevará un mayor número de deslizamientos superficiales y corrientes de derrubios, cuyos efectos pueden verse exacerbados por los cambios de uso del suelo que provocan un menor recubrimiento vegetal. El aumento de la precipitación invernal haría reactivar los grandes deslizamientos con mayor frecuencia.



En las abruptas pendientes de las altas cumbres nevadenses abundan los desprendimientos rocosos. En la imagen se aprecia la cara norte del Pico Mulhacén y la Laguna de Mulhacén.

➤ Objetivos y metodología

Los movimientos de ladera o deslizamientos son un riesgo geológico de origen natural o inducido que debe tenerse muy en cuenta en la planificación del territorio [26-29]. Las pérdidas materiales asociadas a los deslizamientos pueden alcanzar costes muy elevados, lo que justifica la importancia de los estudios de carácter preventivo. En este trabajo se ha desarrollado una metodología propia para estimar la susceptibilidad frente a deslizamientos en el Parque Nacional de Sierra Nevada.

La mayor parte de los estudios de susceptibilidad frente a inestabilidades de ladera únicamente incluyen variables dependientes del terreno (Modelo Digital de Elevaciones). No obstante, en este estudio se han considerado

variables externas al modelo y directamente relacionables con el clima. Para ello se ha desarrollado un software (GISLAN) sobre un sistema de información geográfica (ArcGIS) que se apoya en herramientas de cálculo probabilístico externas. En este trabajo se analizan variables que nunca se habían tenido en cuenta en estudios previos de susceptibilidad en esta región, tales como: el índice de vegetación normalizado (NDVI); los ciclos de fusión y duración de la nieve; y el umbral de escorrentía superficial (Po). Se han diferenciado 3 tipologías de movimientos de ladera por separado: deslizamientos, flujos, y desprendimientos. Para cada tipología se ha realizado un inventariado de movimientos mediante fotointerpretación y posterior validación en campo.

El método utilizado para evaluar la susceptibilidad se basa en un análisis estadístico multivariante, con el fin de obtener las variables que expliquen mejor las varianzas de las distribuciones para cada tipología de movimiento. Para ello se ha realizado un Análisis de Componentes Principales (ACP) para cada tipología de movimiento. Posteriormente, mediante un análisis discriminante se ha evaluado el peso de las distintas variables para elaborar mapas de zonificación de la susceptibilidad del terreno frente a cada uno de los tipos de movimientos considerados. El mapa de susceptibilidad total resultante se ha realizado sobre la base de los tres mapas de susceptibilidad considerados.

➤ Resultados

De las tres nuevas variables analizadas, el número de ciclos de fusión de nieve y el número de días de permanencia de la misma son las que menor peso parecen tener, aunque su incidencia en la generación de deslizamientos de carácter superficial es considerable.

El índice de vegetación normalizado obtenido por medio de las bandas roja, azul, e infrarroja cercana de la imagen de Satélite LandSat TM (Julio, 2010) es crítico en los tres tipos de movimientos analizados. Este índice refleja el estado de la vegetación en un momento concreto del tiempo, por lo que sería muy interesante en un futuro estudiar la variación del mismo en el tiempo, considerando también las variaciones estacionales. Estas variaciones podrían tener una influencia importante en la susceptibilidad del terreno frente a movimientos de ladera.

El tipo y uso del suelo se han evaluado conjuntamente a través del umbral de escorrentía. Este factor tiene una importancia diferente en los distintos tipos de movimientos; presenta un gran peso en la susceptibilidad frente a deslizamientos, y mucho menor en flujos y desprendimientos. Este hecho refuerza la idea de que en este tipo de estudios de susceptibilidad, se deben estudiar por separado los distintos tipos de movimientos, pues los factores que influirán



Deslizamiento rotacional en el valle del río Lanjarón.

en unos y otros pueden no tener el mismo peso, e incluso ser diferentes. Aquí solo se presenta el mapa de susceptibilidad total frente a movimientos de ladera que se ha realizado a partir de los mapas específicos de susceptibilidad frente a deslizamientos, flujos y desprendimientos.

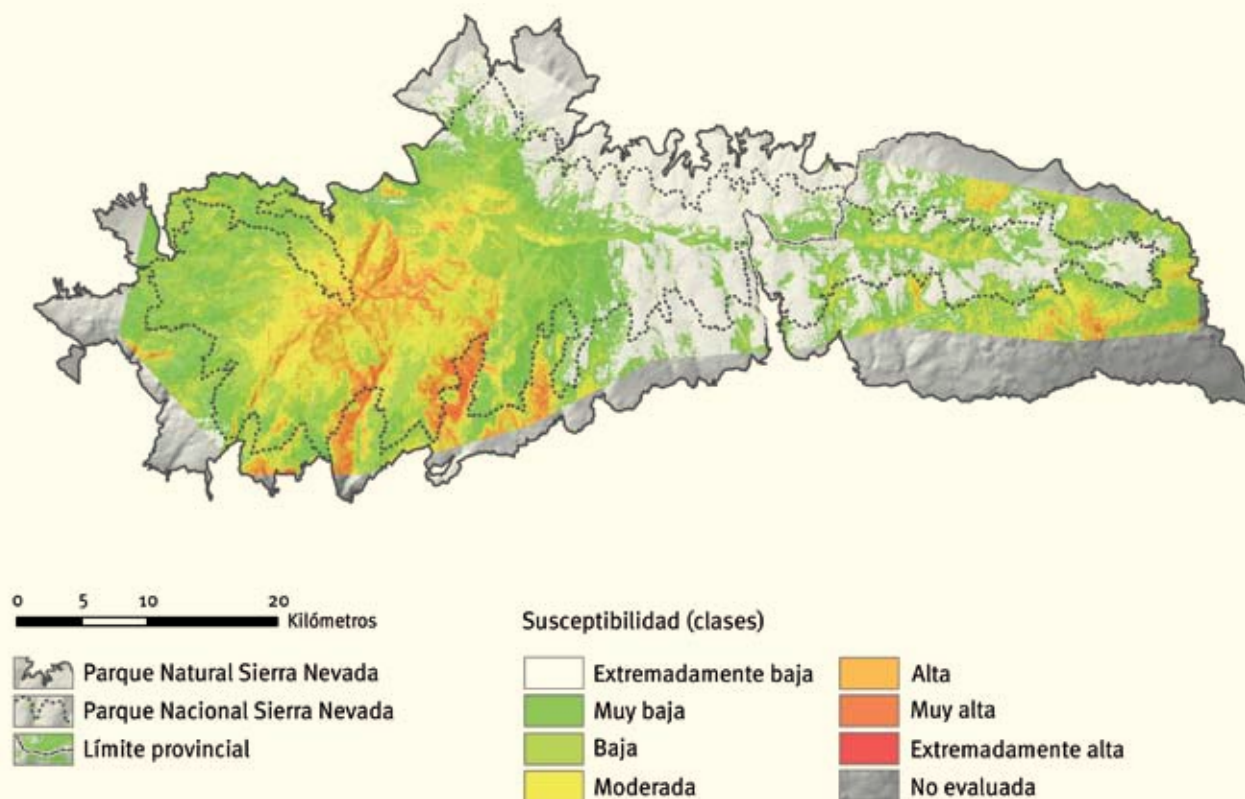
En el mapa de la Figura 1 se aprecia que las principales inestabilidades se concentran en la parte occidental de Sierra Nevada, donde las nuevas variables climáticas contempladas en este estudio tienen más peso. No obstante, también es cierto que los procesos superficiales desarrollados durante el último millón de años son más activos en este sector. Así, en este

sector aparecen las máximas elevaciones, las laderas son más escarpadas y la tasa de incisión de la red de drenaje es más elevada. La red fluvial, re-excavada sobre los escasos vestigios de morfología glaciar, condiciona las áreas donde se producen las principales inestabilidades de ladera.

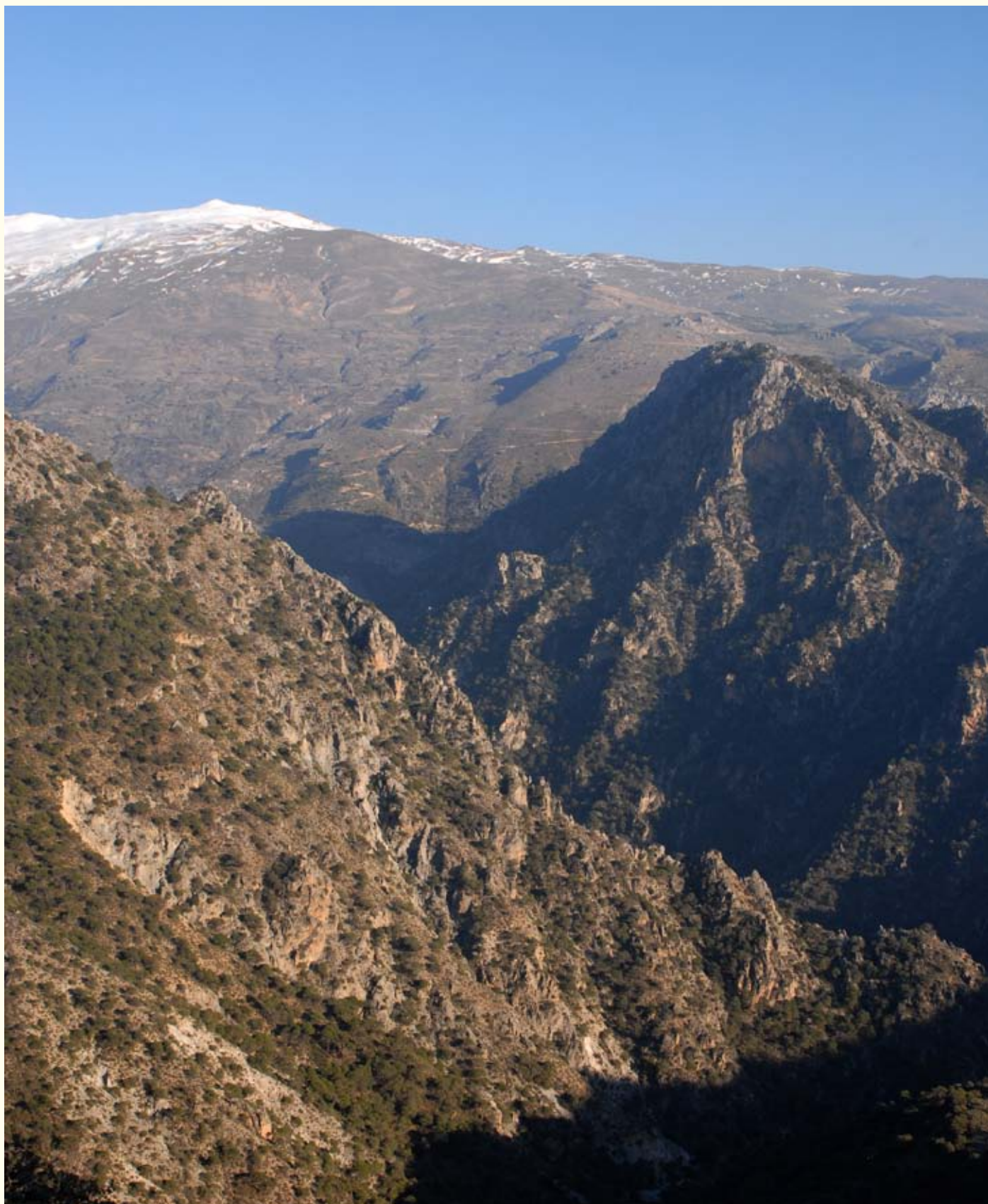
En lo que se refiere a las consecuencias del cambio climático, la incertidumbre sobre el aumento futuro de la frecuencia de las precipitaciones torrenciales y de los episodios anormalmente húmedos no permite realizar afirmaciones concluyentes. El aumento de la torrencialidad conllevará un mayor número de deslizamientos superficiales y corrientes de derrubios, cuyos

efectos pueden verse exacerbados por los cambios de uso del suelo y un menor recubrimiento vegetal del entorno mediterráneo. El aumento de la precipitación invernal haría reactivar los grandes deslizamientos con mayor frecuencia. Esto habrá de ser tenido en cuenta a la hora de plantear actuaciones que puedan aumentar el riesgo de deslizamientos, especialmente en los sectores donde el análisis realizado ha puesto de manifiesto una mayor inestabilidad de ladera. En estas zonas, es importante que las actuaciones que se planifiquen en el futuro vayan encaminadas a mantener o aumentar el recubrimiento vegetal para minimizar las pérdidas de suelo.

Figura 1



Mapa de susceptibilidad frente a inestabilidades de ladera en el Parque Nacional y Natural de Sierra Nevada.



Valle del Río Dúrcal con el Pico del Caballo al fondo.

Bibliografía

› Más referencias en http://refbase.iecolab.es/ref_dossier_resultados.html”

8.1 Historia reciente de la gestión forestal en Sierra Nevada: implicaciones para la adaptación al cambio global

- [1] Bonet García, F.J.; Villegas Sánchez, I.; Navarro, J. & Zamora R. (2009). Breve historia de la gestión de los pinares de repoblación en Sierra Nevada. Una aproximación desde la ecología de la regeneración. En: S.E.C.F. & Junta de Castilla y León. Actas del 5º Congreso Forestal Español. Montes y sociedad: Saber qué hacer. Ávila.
- [2] Kammesheidt, L.; Torres-Lezama, A.; Franco, W. & Plonczak, M. (2001). History of logging and silvicultural treatments in the western Venezuelan plain forests and the prospect for sustainable forest management. *Forest Ecology and Management*, 148: 1-20.
- [3] Cano, L.; Castillo, A.; de la Hoz, F.M.; & Cabrera, M. (1998). Ordenación de nueve montes de la zona del Marquesado en el Parque Natural de Sierra Nevada, Granada. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 6: 215-236.
- [4] Ortigosa Izquierdo, L. 1990. Las repoblaciones forestales como estrategia pública de intervención en regiones degradadas de montaña. Pp: 298-311. En: García-Ruiz, J.M. (Ed). Geoecología de las áreas de montaña. 298-311. Georeforma Ediciones. Logroño.
- [5] Arias Abellán, J. (1981). La repoblación forestal en la vertiente norte de Sierra Nevada. *Cuadernos Geográficos de la Universidad de Granada*, 11: 283-306.

8.2 Diseño y seguimiento de la restauración post-incendio en Lanjarón

- [6] Gómez-Aparicio, L.; Zamora, R.; Gómez, J.M.; Hódar, J.A.; Castro, J. & Baraza, E. (2004). Applying plant facilitation to forest restoration: A meta-analysis of the use of shrubs as nurse plants. *Ecological Applications*, 14: 1128-1138.
- [7] Castro J., Allen C.D., Molina-Morales M., Marañón-Jiménez S., Sánchez Miranda A. & Zamora R. (2011). Salvage logging versus the use of burnt wood as a nurse object to promote post-fire tree seedling establishment. *Restoration Ecology* 19: 537-544.

- [8] Marañón-Jiménez, S. & Castro, J. (2013). Effect of decomposing burnt wood on soil fertility and nutrient availability in a Mediterranean ecosystem. *Biogeochemistry*, 112: 519-535.
- [9] Marañón-Jiménez, S.; Castro, J.; Querejeta, J.L.; Fernández-Ondoño, E. & Allen, C. D. (2013). Burnt coarse woody debris as nurse structures to promote post-fire seedling regeneration. *Forest Ecology and Management*, 308: 231-239.
- [10] Serrano-Ortiz, P.; Marañón-Jiménez, S.; Reverter, B.R.; Sánchez-Cañete, E.P.; Castro, J.; Zamora, R. & Kowalski, A.S. (2011). Post-fire salvage logging reduces carbon sequestration in Mediterranean coniferous forest. *Forest Ecology and Management*, 262: 2287-2296.

8.3 Dinámica poblacional de la procesionaria del pino: respuestas a los cambios en el clima y en el manejo forestal

- [11] Battisti, A., Stastny, M., Netherer, S., Robinet, C., Schopf, A., Roques, A. & Larsson, S. (2005). Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. *Ecological Applications*, 15: 2084-2096
- [12] Hódar, J.A. & Zamora, R. (2004). Herbivory and climatic warming: a Mediterranean outbreaking caterpillar attacks a relict, boreal pine species. *Biodiversity and Conservation*, 13: 493-500.
- [13] Hódar, J.A.; Zamora, R. & Cayuela, L. (2012). Climate change and the incidence of a forest pest in Mediterranean ecosystems: can the North Atlantic Oscillation be used as a predictor?. *Climatic Change* 113: 699-711.
- [14] Cayuela, L.; Hódar, J.A. & Zamora, R. (2011). Is insecticide spraying a viable and cost-efficient management practice to control pine processionary moth in Mediterranean woodlands?. *Forest Ecology and Management*, 261: 1732-1737.
- [15] Dulaurent, A.M.; Porté, A.J.; van Halder, I.; Vetillard, F.; Menassieu, P. & Jactel, H. (2012). Hide and seek in forests: colonization by the pine processionary moth is impeded by the presence of nonhost trees. *Agricultural and Forest Entomology*, 14:19-27.

8.4 Naturalización de pinares de repoblación: preparando el bosque para el cambio

- [16] Gómez-Aparicio, L.; Zavala, M.A.; Bonet, F.J. & Zamora, R. (2009). Are pine plantations valid tools for restoring Mediterranean forests? An assessment along abiotic and biotic gradients. *Ecological Applications*, 19(8): 2124–2141.
- [17] González-Moreno, P.; Quero, J.L.; Poorter, L.; Bonet, F.J. & Zamora, R. (2011). Is spatial structure the key to promote plant diversity in Mediterranean forest plantations?. *Basic and Applied Ecology*, 12: 251–259.
- [18] Zamora, R.; Hódar, J.A.; Matías, L. & Mendoza, I. (2010). Positive adjacency effects mediated by seed disperser birds in pine plantations. *Ecological Applications*, 20(4): 1053-1060.
- [19] Serrada, R.; Aroca, M.J.; Roig, S.; Bravo, A. & Gómez, V. (2011). Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en el sector forestal. Notas sobre gestión adaptativa de las masas forestales ante el cambio climático. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 126 p.
- [20] Simón, N. (2013). Evaluación mediante imágenes estereoscópicas hemisféricas de tratamientos selvícolas en sistemas forestales restaurados. Caso del Parque Nacional de Sierra Nevada. Trabajo Fin de Máster. Universidad de Alcalá, Universidad Complutense, Universidad Politécnica de Madrid y Universidad Rey Juan Carlos.

8.5 Impactos del cambio global en los robledales de Sierra Nevada: algunas evidencias y recomendaciones de manejo

- [21] Valbuena-Carabaña, M. & Gil, L. (2013). Genetic resilience in a historically profited root sprouting oak (*Quercus pyrenaica* Willd.) at its southern boundary. *Tree Genetics & Genomes*, 9 (5): 1129–1142.
- [22] Benito, B.M.; Lorite, J. & Peñas, J. (2011). Simulating potential effects of climatic warming on altitudinal patterns of key species in Mediterranean-alpine ecosystems. *Climatic Change* 108(3): 471-483.
- [23] Aspizua, R.; Barea-Azcón, J.M.; Bonet, F.J.; Pérez-Luque, A.J. & Zamora, R. (Eds.) (2012). Observatorio de Cambio Global Sierra Nevada: metodologías de seguimiento. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía.

- [24] Zamora, R. & Barea-Azcón, J.M. (2015). Long-term changes in mountain passerine bird communities in the Sierra Nevada (southern Spain): A 30-year case study. *Ardeola* 62(1): 3-18.

- [25] Vericat, P; Piqué, M. & Serrada, R. (2012). Gestión adaptativa al cambio global en masas de *Quercus* mediterráneos. Centre Tecnològic Forestal de Catalunya. Solsona (Lleida). 172 p.

8.6 Análisis de la susceptibilidad frente a inestabilidades de ladera en el Parque Nacional de Sierra Nevada

- [26] Irigaray-Fernández, C. (1995). Movimientos de ladera: Inventario, análisis y cartografía de susceptibilidad mediante un Sistema de Información Geográfica. Aplicación a las zonas de Colmenar (Málaga), Rute (Córdoba) y Montefrío (Granada). Tesis Doctoral, Universidad de Granada.
- [27] Hamdouni, R. (2001). Estudio de movimientos de ladera en la cuenca del Río Ízbor mediante un SIG: Contribución al conocimiento de la relación entre tectónica activa e inestabilidad de vertientes. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, Granada, 429 pp.
- [28] Santacana, N. (2001). Análisis de susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales y grandes deslizamientos mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica. Aplicación a la cuenca alta del Río Llobregat. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- [29] Irigaray-Fernández, C. & Chacón-Montero, J. (2002). Métodos de análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante S.I.G. Pp: 21-36. En: F.J. Ayala Carcedo, F.J. & Corominas Dulcet, J. (Eds.). Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas SIG. Fundamentos y aplicaciones en España. Instituto Geológico y Minero de España.



Socioeconomía y servicios ecosistémicos

En los últimos 50 años, la humanidad ha modificado los ecosistemas de forma más rápida e intensa que en cualquier otro período comparable de la historia de la humanidad, en gran medida para satisfacer unas demandas crecientes de comida, agua, madera, fibras y combustibles. El resultado ha sido una alteración sustancial del funcionamiento de los ecosistemas en todo el planeta, fenómeno conocido como cambio global.

Los ecosistemas ofrecen servicios a la sociedad tanto de abastecimiento (alimento, agua, madera) como de regulación (control de inundaciones, depuración de aguas, depuración del aire) y servicios culturales (estéticos, espirituales, educativos, recreativos). La importancia de la conservación de la estructura, funcionamiento y dinámica de los ecosistemas, conceptuados como un capital natural, se hace más evidente cuando se reconoce su papel imprescindible para la provisión de servicios a la sociedad.

La gestión del capital natural reclama la administración del territorio de una forma global y coherente, ya que los procesos que determinan el funcionamiento y función de los ecosistemas se extienden más allá de los límites administrativos de los espacios protegidos y comprometen a diversas políticas como son la de planificación hidrológica, la de turismo, las políticas agrarias y las de conservación de la biodiversidad, entre otras, en el contexto de la ordenación territorial. Dentro del proceso emergente del cambio global, las áreas prote-

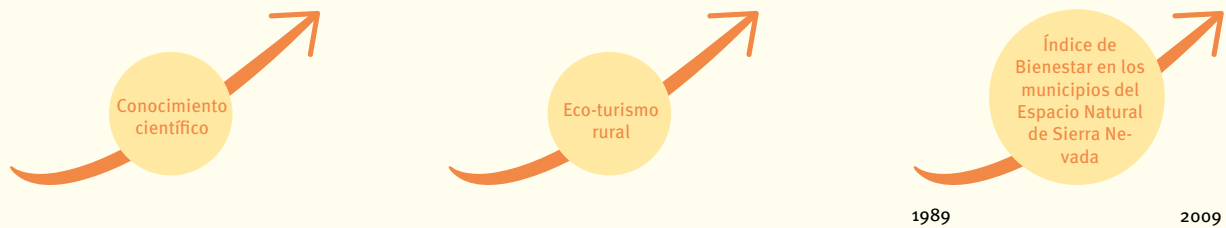
Abastecimiento



Regulación



Culturales



Resumen gráfico de los principales resultados mostrados en este capítulo. Todas las gráficas excepto la última están basadas en la percepción de distintas personas recopilada a través de encuestas. La última gráfica muestra resultados objetivos a partir de datos reales. Todas las gráficas reflejan tendencias de cambio desde el pasado hasta el futuro.

gidas se enfrentan a numerosos problemas, destacando los cambios de usos del suelo de su entorno y la falta de apoyo de las poblaciones locales por las restricciones de usos que imponen. Hoy día los problemas de conservación de las áreas protegidas, ya sean terrestres o marinas, están principalmente fuera de sus límites y son fundamentalmente de carácter socioeconómico.

En el presente capítulo se muestran dos ejemplos que ponen de manifiesto la importancia

de los espacios naturales protegidos desde un punto de vista socioeconómico. Por un lado los espacios naturales protegidos, además de actuar como instrumentos para la conservación de la biodiversidad y los procesos ecológicos, contribuyen de forma esencial a la protección de la capacidad de sus ecosistemas de generar servicios. Por otro lado, mediante el análisis de diferentes indicadores socioeconómicos, se pone de manifiesto como el bienestar en los municipios pertenecientes a áreas protegidas ha aumentado en los últimos años.

Por tanto, desde un punto de vista socioeconómico, las áreas protegidas actúan como generadoras de servicios ecosistémicos que se disfrutan tanto dentro del espacio protegido como fuera de éste, favoreciendo el bienestar de los municipios existentes dentro de los espacios protegidos.

9.1. Evolución y distribución espacial de los flujos de servicios de los ecosistemas del sistema socioecológico del Espacio Natural de Sierra Nevada

Palomo, I.^{1,2}; Martín-López, B.² y Montes, C.²
¹ Basque Centre for Climate Change ² Universidad Autónoma de Madrid

Resumen

Las evaluaciones de los servicios de los ecosistemas para la gestión ambiental están aumentando considerablemente en los últimos años. Sin embargo, apenas existen aplicaciones a la gestión de espacios naturales protegidos. Por ello se realizó un taller participativo con gestores e investigadores asociados al Espacio Natural de Sierra Nevada (ENSN), para evaluar las percepciones de los participantes sobre la evolución temporal de los servicios de los ecosistemas y su distribución espacial (incluyendo el suministro y la demanda de servicios). Los resultados muestran que determinados servicios de los ecosistemas como el control de la erosión o los valores estéticos están disminuyendo, mientras que otros, como el turismo de naturaleza y rural y el conocimiento científico, aumentan. Los servicios son generados principalmente por los ecosistemas protegidos del ENSN, especialmente la zona de cumbres, mientras que los beneficiarios de los mismos se encuentran principalmente fuera de los límites del ENSN, en Granada y otras poblaciones cercanas.

> Objetivos y metodología

La creación de áreas protegidas es uno de los principales instrumentos para la conservación de la naturaleza [1,5]. Son varias las iniciativas internacionales que han resaltado la importancia de considerar los servicios de los ecosistemas en la conservación, destacando la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MA), Economía de los Ecosistemas y la Biodiversidad (TEEB) y el Panel Intergubernamental sobre biodiversidad y servicios de los ecosistemas (IPBES). En este trabajo se presenta un primer acercamiento a la inclusión de los servicios de los ecosistemas en la gestión de áreas protegidas aplicado al ENSN. En verano del 2011 se celebró un taller participativo con 20 participantes incluyendo gestores del ENSN de diferentes áreas, gestores ambientales de ámbito regional e investigadores de las universidades de Granada y Almería. Los participantes seleccionaron los servicios de los ecosistemas más importantes en el ENSN, así como su evolución desde las últimas décadas hasta el presente. Posteriormente se cartografiaron las unidades suministradoras de los servicios, las unidades suministradoras de servicios en declive y los beneficiarios de los servicios. Los mapas se fotografiaron mediante una cámara digital SLR y se importaron y analizaron mediante un Sistema de Información Geográfica (ArcGIS 9.2).

> Resultados

Los servicios considerados más importantes, su tendencia, y las escalas a las que se ubican los beneficiarios de los mismos se detallan en la Tabla 1. Los servicios asociados al agua son considerados clave en el ENSN, al igual que el hábitat para especies. Por otro lado, el control de la erosión, la regulación climática, los

valores estéticos y el alimento que proviene de la agricultura extensiva deberían considerarse servicios prioritarios debido a su tendencia regresiva. Por último, se puede apreciar que la escala a la que se disfrutan los servicios abarca desde lo local hasta lo global.

Tabla 1

Servicio del ecosistema	Importancia relativa (%)	Tendencia	Escala de los beneficiarios
Abastecimiento de agua	27	↑	Regional-local
Hábitat para especies	17	↔	Global-regional-local
Regulación hídrica	17	↔	Regional-local
Ecoturismo	7	↑	Global-regional-local
Turismo rural	7	↑	Global-regional-local
Regulación climática	6	↓	Global-regional-local
Calidad del aire	5	↔	Global-regional-local
Control de la erosión	4	↓	Regional-local
Conocimiento científico	4	↑	Global-regional-local
Turismo de esquí	4	↔	Regional-local
Valores estéticos	2	↓	Global-regional-local
Alimento de agricultura extensiva	1	↓	Local

Servicios de los ecosistemas generados por el ENSN más importantes para el bienestar humano según los participantes del taller, importancia relativa de los mismos respecto al total de servicios seleccionados, tendencia percibida y escala a la que se encuentran los beneficiarios.

La cartografía participativa de servicios de los ecosistemas ha dado como resultado los mapas que aparecen en la Figura 1. Como se puede observar, los ecosistemas incluidos dentro del límite del parque nacional aparecen como

los principales suministradores de servicios de los ecosistemas, destacando las zonas altas debido a la importancia de los servicios asociados al agua. Las unidades suministradoras de servicios percibidos en declive coinciden

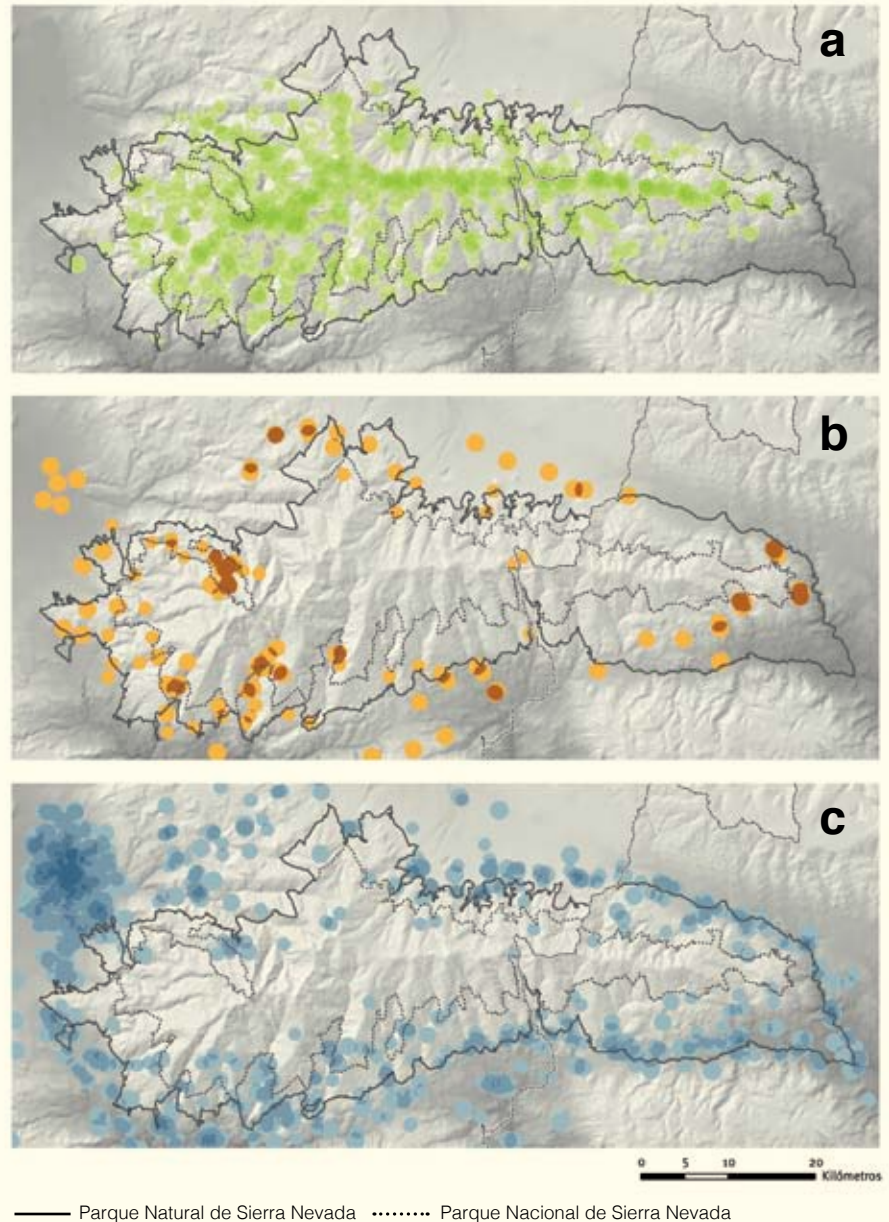
principalmente con la estación de esquí de Pradollano (Figura 1b). Los beneficiarios de los servicios se encuentran mayoritariamente en el área metropolitana de Granada y en Almería.

➤ Discusión y conclusiones

El presente trabajo constituye una primera aproximación a la gestión de los espacios naturales bajo el marco de los servicios de los ecosistemas [4]. La inclusión de los servicios de los ecosistemas intenta reconectar a los seres humanos y la naturaleza mediante el reconocimiento explícito de los valores instrumentales de la misma [2]. En concreto para los espacios naturales, esta estrategia busca aumentar el apoyo social a los mismos, al mostrar los múltiples servicios de los ecosistemas que generan. Los resultados muestran como se percibe que determinados servicios de los ecosistemas se encuentran en regresión, algunos de ellos, como la regulación climática o la pérdida de valores estéticos, debido a los efectos del cambio global. Los resultados indican además como la gestión del ENSN debería realizarse a múltiples escalas espaciales dado que beneficiarios de servicios de Sierra Nevada se ubican en las escalas local, regional y global. Este desacoplamiento escalar entre el suministro y demanda de servicios ha sido mostrado por otros estudios con servicios asociados a los bosques en Sierra Nevada [3]. La cartografía de servicios ha permitido identificar zonas concretas para la gestión. Por ejemplo la zona de Güéjar Sierra anexa al Parque Nacional (que no está declarada como Parque Natural) debería ser considerada una zona prioritaria de gestión, ya que genera múltiples servicios y no está protegida. Pradollano aparece como un ejemplo de área con servicios en declive, por lo que podría ser considerada una zona prioritaria para la restauración.

El carácter del estudio realizado, mediante la participación de investigadores y gestores, ha permitido acercar un nuevo marco teórico y metodológico a la gestión del ENSN. Este es un hecho relevante dadas las llamadas de organismos internacionales como la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza o la Unión Europea a introducir los servicios de los ecosistemas en la gestión de los espacios naturales. Además, la participación permite el necesario acercamiento entre los mundos de la investigación y la gestión.

Figura 1



Distribución espacial de las unidades suministradoras de servicios (a: verde), las unidades suministradoras de servicios en declive (b: rojo) y los beneficiarios de los servicios (c: azul) según las percepciones de los participantes.

9.2. Análisis temporal del bienestar en los municipios del Espacio Natural de Sierra Nevada

Pérez-Luque, A.J.; Moreno-Llorca, R. A.; Pérez-Pérez, R. y Bonet, F.J.
Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía, Universidad de Granada

Resumen

Se ha llevado a cabo una caracterización del bienestar en los municipios del Espacio Natural de Sierra Nevada. Para ello se ha recopilado información de 22 indicadores socioeconómicos pertenecientes a ocho dimensiones del bienestar. Se ha realizado un análisis diacrónico entre dos momentos temporales: antes de la creación del espacio natural y tras 20 años. Los resultados ponen de manifiesto que el bienestar ha aumentado en los municipios del Espacio Natural de Sierra Nevada entre 1989 y 2009. Comparaciones con otros trabajos revelan cómo el aumento del bienestar es mayor en aquellos municipios pertenecientes a áreas protegidas.

> Objetivos y metodología

Para analizar el bienestar en los municipios del Espacio Natural de Sierra Nevada se ha llevado a cabo una aproximación basada en indicadores compuestos ponderados [6]. Se utilizó el índice sintético de bienestar DP₂ que agrega diferentes indicadores simples que caracterizan el bienestar [7]. Este indicador permite realizar comparaciones entre entidades espaciales y temporales y ha sido ampliamente utilizado en la medición del bienestar a diferentes escalas [8]. Para su construcción se ha utilizado información de 22 indicadores socioeconómicos que representan diferentes dimensiones del bienestar (Tabla 1). Esta información procede de la recopilación de información socioeconómica del ámbito del Espacio Natural de Sierra Nevada que se ha integrado dentro del sistema de información del Observatorio del Cambio Global de Sierra Nevada (<https://linaria.obsnev.es>). Para cada municipio se calculó el índice DP₂ en 1989 y 2009, utilizando un algoritmo de software libre [10]. Posteriormente se ha comparado su evolución mediante la creación de un ratio del indicador para cada municipio, donde valores positivos indican mejora del bienestar entre 1989 y 2009.

Tabla 1

Dimensiones	Indicadores	
	Población	Nacimientos Crecimiento de la población Emigración interior Inmigración interior Índice de envejecimiento
	Salud	Centros de salud
	Empleo	Población empleada Población desempleada
	Economía y Renta	IAE: Actividades empresariales Renta declarada Parque de autobuses Parque de camiones Parque de furgonetas Parque de automóviles
	Infraestructuras	Hostales y Pensiones Líneas telefónicas
	Educación	Centros educativos Alumnos de primaria Profesores de primaria
	Cultura y ocio	Bibliotecas públicas Restaurantes
	Participación social	Participación en elecciones

Indicadores utilizados en el cálculo del bienestar para cada municipio.
Se indica la dimensión del bienestar al que pertenece.

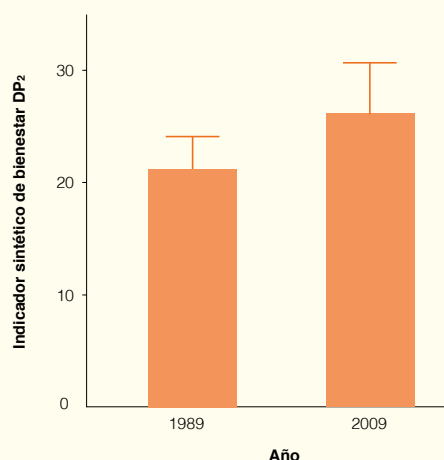
➤ Resultados

Para los municipios del Espacio Natural de Sierra Nevada analizados, se ha observado un aumento significativo en el bienestar entre 1989 y 2009 (Figura 1). De los 56 municipios para los

que se dispone de datos, solamente se observó una disminución del índice de bienestar en 3 municipios (valores del ratio de bienestar inferiores a 1) (Figura 2). Por otro lado, no se ha

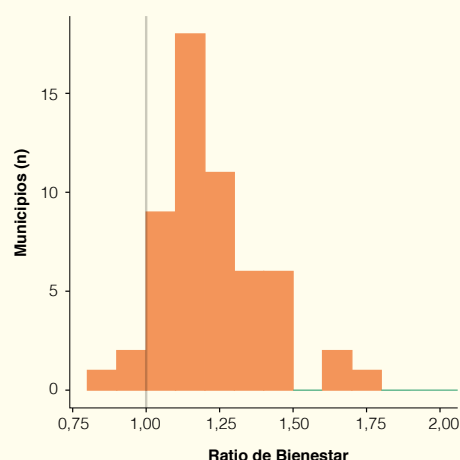
encontrado relación entre aumento de bienestar y el porcentaje de superficie incluida en un área protegida.

Figura 1



Indicador sintético de bienestar DP2 (media ± error estándar) para los municipios del Espacio Natural de Sierra Nevada entre 1989 y 2009.

Figura 2



Histograma del número de municipios frente al ratio de bienestar.

➤ Discusión y conclusiones

Los datos de aumento de bienestar entre 1989 y 2009 obtenidos para los municipios del Espacio Natural de Sierra Nevada, concuerdan con los obtenidos para toda Andalucía en ese periodo [9]. Resultados observados a escala regional indican que los municipios pertenecientes a Parque Natural presentan un mayor aumento del bienestar entre 1989 y 2009 que aquellos que están fuera del Parque Natural.

Nuestros resultados inciden en la importancia de las áreas protegidas, no solo desde el punto de vista de la conservación de la biodiversidad, sino como generadores de servicios ecosistémicos beneficiosos para la sociedad por su relevancia socioeconómica.



Senderistas en la ascensión de los Lavaderos de la Reina.

Bibliografía

› Más referencias en http://refbase.iecolab.es/ref_dossier_resultados.html

9.1. Evolución y distribución espacial de los flujos de servicios de los ecosistemas del sistema socioecológico del Espacio Natural de Sierra Nevada

- [1] Bertzky, B.; Corrigan, C.; Kemsey, J.; Kenney, S.; Ravilious, C.; Besançon, C. & Burgess, N. (2012). *Protected Planet Report 2012: Tracking progress towards global targets for protected areas*. IUCN, Gland, Switzerland and UNEP-WCMC, Cambridge, UK.
- [2] Folke, C.; Jansson, Å.; Rockström, J.; Olsson, P.; Carpenter, S.R.; Chapin, F.S., III; Crépin, A.-S.; Daily, G.; Danell, K.; Ebbesson, J.; Elmqvist, T.; Galaz, V.; Moberg, F.; Nilsson, M.; Österblom, H.; Ostrom, E.; Persson, Å.; Peterson, G.; Polasky, S.; Steffen, W.; Walker, B. & Westley, F. (2011). Reconnecting to the biosphere. *Ambio*, 40 (7): 719–738.
- [3] García-Nieto, A.P.; García-Llorente, M.; Iniesta-Arandia, I. & Martín-López, B. (2013). Mapping forest ecosystem services: from providing units to beneficiaries. *Ecosystem Services*, 4: 126–138.
- [4] Palomo, I.; Martín-López, B.; Potschin, M.; Haines-Young, R. & Montes, C. (2013). National Parks, buffer zones and surrounding lands: mapping ecosystem service flows. *Ecosystem Services*, 4: 104–116.
- [5] Palomo, I.; Montes, C.; Martín-López, B.; González, J.A.; García-Llorente, M.; Alcorlo, P. & Mora, M.R.G. (2014). Incorporating the social-ecological approach in protected areas in the anthropocene. *BioScience*, 64 (3): 181–191.

9.2. Análisis temporal del bienestar en los municipios del Espacio Natural de Sierra Nevada

- [6] Pena, B. (2009). La medición del bienestar social: una revisión crítica. *Estudios de Economía Aplicada*, 27 (2): 299–324.
- [7] Somarriba, N. & Pena, B. (2009). Synthetic indicators of quality of life in Europe. *Social Indicators Research*, 94 (1): 115–133.
- [8] Zarzosa Espina, P. & Somarriba Arechavala, N. (2013). An assessment of social welfare in Spain: territorial analysis using a synthetic welfare indicator. *Social Indicators Research*, 111 (1): 1–23.
- [9] Bonet-García, F.J.; Pérez-Luque, A.J.; Moreno-Llorca, R.; Pérez-Pérez, R.; Puerta-Piñero, C.; Zamora, R. (2015). Protected areas as elicitors of human well-being in a developed region: A new synthetic (socioeconomic) approach. *Biological Conservation*, 187: 221–229.
- [10] Pérez-Luque, A.J.; Moreno, R.; Pérez-Pérez, R. & Bonet, F.J. (2012). *p2distance: Welfare's Synthetic Indicator. R package version 1.0.1*, computer software. Disponible en: <http://CRAN.R-project.org/package=p2distance>.

Capítulo 10

Nube de polvo sahariano sobre el mar de Alborán. Imagen tomada por el sensor SeaWiFS de la NASA el 23 de marzo de 1999.

Sierra Nevada como observatorio del cambio global a escala planetaria

Las montañas constituyen unos enclaves privilegiados para llevar a cabo iniciativas de investigación y seguimiento del cambio global, ya que son observatorios de procesos remotos. Dos tipos de procesos provocan cambios a gran escala. Por un lado, los procesos que han adquirido una dimensión planetaria pero sólo mediante la suma de impactos locales (como la fragmentación del territorio o los cambios de usos del suelo). Por otro, los que, con independencia de cuál sea su origen, tienen efectos que se propagan a escala planetaria a través de las envolturas fluidas de la Tierra: las aguas

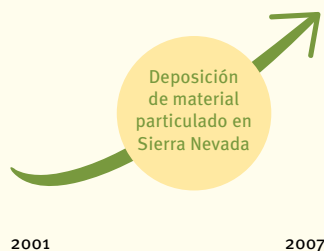
oceánicas y continentales y, sobre todo, la atmósfera. En esta segunda clase se incluyen los procesos considerados más genuinamente globales, y son precisamente los procesos que pueden observarse mejor desde las montañas, como atalayas privilegiadas. En este sentido, las montañas son observatorios privilegiados de la atmósfera, y todos los aspectos relacionados con el clima, como balance energético, radiación ultravioleta, deposición de partículas atmosféricas y contaminantes, gases de efecto invernadero, o el transporte de formas biológicas de resistencia y microorganismos.

Desde Sierra Nevada se está llevando a cabo un seguimiento de la radiación electromagnética que emiten los rayos de las tormentas que se producen en diferentes lugares de la Tierra, particularmente en el cinturón tropical.

Esta radiación se transmite a través de todo el globo terráqueo a través de la capa atmosférica existente entre la tierra y la ionosfera, la cual actúa como guía de ondas. La estación de medida ELF “Juan Antonio Morente”, situada en la Loma del Mulhacén a 2500 msnm de altitud, constituye una herramienta valiosa para hacer un

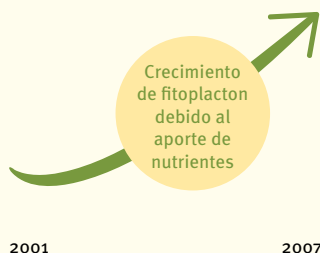
La resonancia de Schumann

es un buen indicador de la temperatura de la Tierra



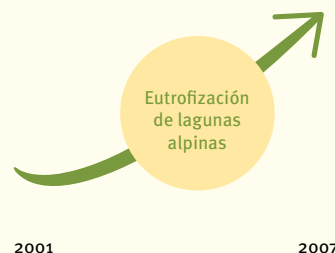
Las concentraciones de SO₂ y NO₂

son más altas en Granada que en Sierra Nevada



La generación de aerosoles

está aumentando a escala global.



Resumen gráfico de los principales resultados descritos en el presente capítulo. Evolución de variables biofísicas desde 2001 hasta 2007.

seguimiento planetario desde Sierra Nevada de los principales centros tormentosos del planeta. Esta estación mide las llamadas resonancias de Schumann, que actúan como un termómetro global de la Tierra y pueden aportar datos sobre el cambio climático global.

Las montañas son también escenarios muy sensibles a cambios ambientales por los frágiles equilibrios entre los componentes del sistema natural, por lo que sus ecosistemas pueden ser utilizados como sensores de detección temprana de señales de cambio. Por ejemplo, los ecosistemas de alta montaña son importantes sensores de la contaminación global porque su aislamiento de la actividad humana les hace ser receptores, paradójicamente, de la contaminación atmosférica que circula a través de la atmósfera por todo el globo terráqueo y que tiene origen antrópico. Los elementos tóxicos que circulan en la atmósfera, desde metales

hasta pesticidas, se depositan en los ecosistemas de montaña, incorporándose a las cadenas tróficas y ciclos biogeoquímicos. Por ello en Sierra Nevada se realiza un seguimiento de la concentración de contaminantes como el SO₂ y el NO₂.

El transporte atmosférico de materiales es muy eficiente, lo que implica que emisiones regionales puedan ser transportadas a larga distancia hasta regiones distantes del planeta. Esta realidad la ponen claramente de manifiesto las investigaciones que se desarrollan en los lagos de alta montaña de Sierra Nevada, que han detectado la manera en que las comunidades se ven afectadas por diferentes vectores del cambio global, especialmente el aumento de la carga de aerosoles. La generación de aerosoles atmosféricos es un fenómeno creciente a escala global que transporta y dispersa a miles de kilómetros partículas, nutrientes, contaminantes y

microorganismos. Los cambios en la circulación atmosférica han aumentado la llegada de polvo del Sáhara, lo cual ha incrementado la cantidad de fósforo atmosférico que se deposita en los lagos. Ese incremento ha comportado a su vez un crecimiento de fitoplancton, que consume el nitrógeno excedente en los lagos y lo lleva a unos niveles inesperadamente bajos. Todo el proceso está provocando cambios en la organización de las redes tróficas y en el equilibrio biogeoquímico de las lagunas. Es, además, un ejemplo claro de cómo el impacto humano llega a lugares remotos y demuestra la necesidad de considerar el impacto del cambio global sobre los ecosistemas desde una perspectiva integrada.

10.1. Seguimiento de la actividad tormentosa en el sistema Tierra a través de la estación ELF “Juan Antonio Morente” de Sierra Nevada

Salinas-Extremera, A.; Fornieles-Callejón, J. y Portí-Durán, J.

Universidad de Granada

Resumen

Se está realizando desde Sierra Nevada un seguimiento de la radiación electromagnética emitida por los rayos de las tormentas que se producen en toda la Tierra. Esta radiación es especialmente intensa en el rango de las frecuencias extremadamente bajas (banda ELF), y se transmiten a través de todo el globo terráqueo a lo largo de la capa entre la tierra y la ionosfera que actúa como guía de ondas. La intensidad de la señal transmitida tiene unos picos a unas frecuencias conocidas como resonancias de Schumann. Las resonancias de Schumann actúan como un sensor global de la Tierra y pueden aportar datos sobre el cambio climático global.

➤ Objetivos y metodología

La atmósfera terrestre se compone de varias capas con características físicas muy diferentes. Desde el punto de vista electromagnético se puede simplificar su estructura y distinguir dos capas: (i) la ionosfera, situada a partir de unos 100 km de altura y caracterizada por una conductividad alta, y (ii) la capa gaseosa, que va desde la superficie terrestre a la ionosfera, caracterizada electromagnéticamente por una conductividad prácticamente nula. En ella se produce la mayor parte de los fenómenos electrodinámicos naturales, siendo las tormentas (los rayos) su principal expresión.

El campo electromagnético producido por los rayos se propaga a través de la atmósfera. La parte del mismo cuya frecuencia está en la banda de los kilohercios (señales que se pueden

captar con una radio próxima a la tormenta en forma de un chasquido) se atenúa a pocos kilómetros de donde se ha producido el rayo. Sin embargo la parte de baja frecuencia (banda ELF -*Extremely Low Frequency*-) se puede propagar por toda la Tierra rebotando continuamente en la ionosfera y la corteza terrestre. Para esta parte del campo electromagnético producido por los rayos, la atmósfera se comporta como una inmensa cavidad delimitada por la corteza terrestre y la ionosfera [1]. Esta señal es la que se conoce como resonancia de Schumann (RS) y es la que se mide en la estación ubicada en las proximidades del Refugio de Poqueira en Sierra Nevada [2].

Se trata de la única estación existente en España que mida las resonancias de Schumann. La

estación consta de dos magnetómetros orientados N-S (sensor 0) y E-O (sensor 1). La señal medida por cada sensor se digitaliza a una frecuencia de muestreo de 256 Hz. Los resultados mostrados en las Figuras 1 y 2 se obtienen haciendo la transformada discreta de Fourier con una ventana de 30 segundos y promediando a una hora.

La calibración de los resultados se efectúa desde frecuencia cero hasta 25 Hz. De la señal promediada se obtienen los máximos de amplitud y las frecuencias correspondientes. Dentro del rango de calibración de la estación se detectan los tres primeros modos de la resonancia de Schumann. La estación también permite detectar variaciones en el cuarto modo.

➤ Resultados

La estación ELF está funcionando de manera ininterrumpida (excepto tareas de mantenimiento) desde julio de 2012 [4]. En las Figuras 1 y 2 se muestran algunos resultados obtenidos del procesamiento de las medidas efectuadas en este periodo.

En la Figura 1 se muestra el espectrograma de la señal en la banda de frecuencias de 6 a 25 Hz de los 5 días primeros del mes de octubre de 2013. En el eje vertical se representa la frecuencia, y la amplitud de la señal para cada frecuencia se recoge en código de colores mediante la escala de la derecha. Cada gráfica corresponde

a un sensor. Se puede observar claramente los tres primeros modos de la RS correspondientes a las frecuencias de 8, 14 y 21 Hz. Estas resonancias se observan con más nitidez durante días de poca actividad eléctrica, como por ejemplo los días 1 y 2, mientras que en días de gran actividad, como el día 4, el espectro se vuelve

más plano, indicando un origen más cercano de la actividad tormentosa. Las variaciones en la frecuencia de resonancia de cada modo permiten determinar la distancia entre observador (la estación) y los centros tormentosos y por tanto pueden servir para hacer un estudio de la deriva anual de éstos.

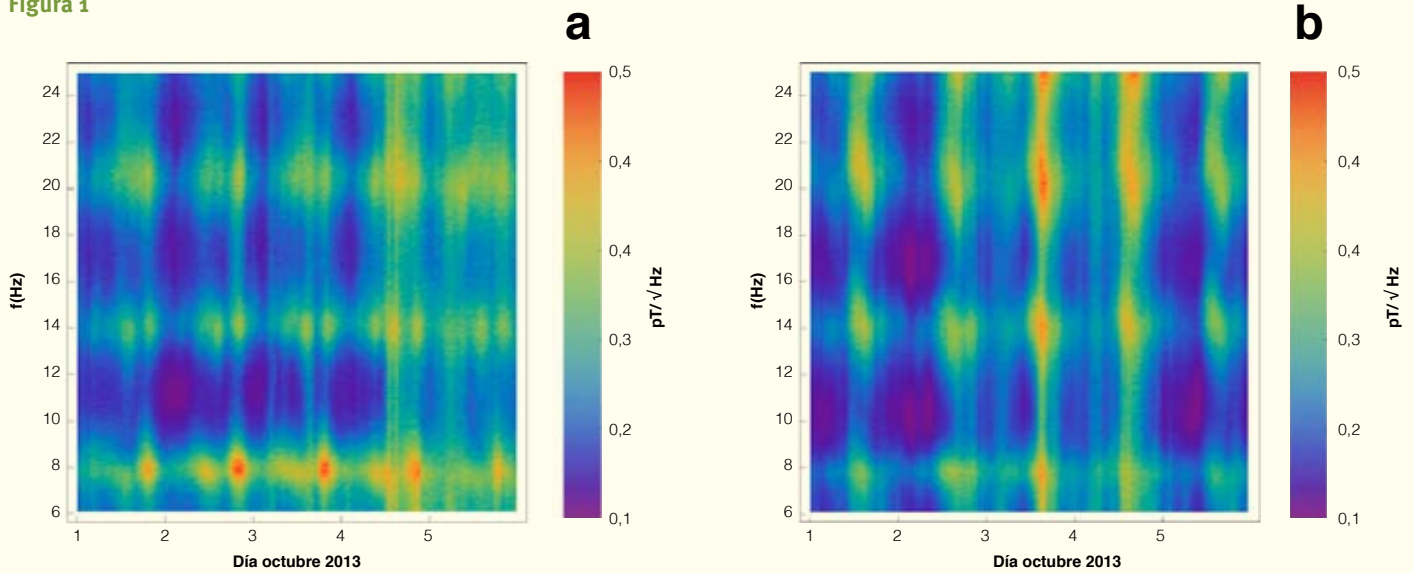
En la Figura 2 se muestra la evolución diurna por periodos estacionales de la amplitud de la

primera resonancia desde marzo de 2013 hasta febrero de 2014, medida por ambos sensores. Se puede apreciar que la amplitud se ve incrementada durante el verano (boreal) frente al invierno (boreal). También se puede observar cómo el sensor 0 recoge picos de actividad tormentosa a las 12 UT y 20 UT aproximadamente, mientras que el sensor 1 presenta picos de amplitud (en el primer modo) durante el amanecer y de forma muy significativa entorno

a las 15 UT, correspondiente a la activación del centro tormentoso de África.

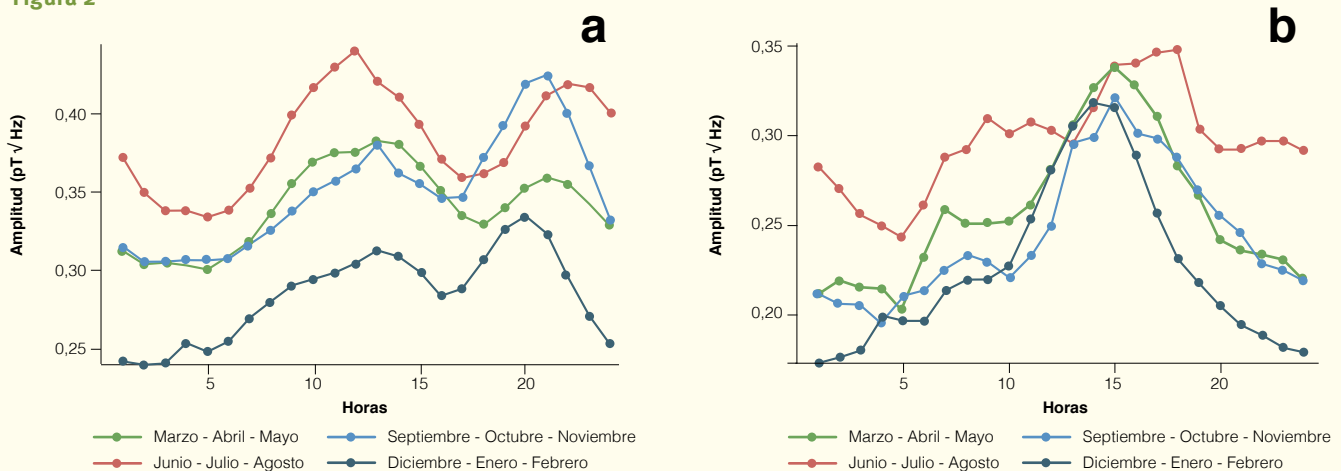
Actualmente se sigue trabajando en el análisis de los datos que la estación aporta. También se está intentando contactar con otros equipos investigadores que dispongan de estaciones ELF u otro tipo de observatorios del ruido electromagnético natural para contrastar medidas.

Figura 1



Espectrograma de la señal medida por el sensor 0 (a), y sensor 1 (b), durante los 5 primeros días de octubre de 2013.

Figura 2



Evolución diurna por periodos estacionales de la amplitud de la primera resonancia medida por el sensor 0 (a), y por el sensor 1 (b), desde marzo de 2013 hasta febrero de 2014

➤ Discusión y conclusiones

La estación de medida ELF “Juan Antonio Morente” constituye una herramienta valiosa para hacer desde Sierra Nevada un seguimiento planetario de los principales centros tormentosos del planeta. Las resonancias de Schumann actúan como un termómetro global de la Tierra y pueden aportar datos sobre el cambio climático global. La conexión entre la resonancia de Schumann y la temperatura tropical de la atmósfera fue establecida a través del número de rayos por segundo que en promedio se están produciendo en toda la Tierra [3]. Por tanto la medida de la RS se puede considerar como un indicador de la temperatura global de la Tierra y su seguimiento a través del tiempo podría suministrar

información del cambio global. Es importante señalar que la medida de la RS en Sierra Nevada no proviene solo del campo electromagnético generado por rayos producidos en las tormentas cercanas, sino que proviene de toda la actividad tormentosa de la Tierra. La RS presenta variación diurna, estival y anual que es posible detectarlas a través de las medidas efectuadas con la estación. La deriva de los núcleos fundamentales de la actividad tormentosa hacia el sur en los años más calurosos, en los que se produce el fenómeno de “*El Niño*”, o hacia el norte en los años más fríos, con el fenómeno asociado de “*La Niña*”, influye en las medidas de la RS, por lo que es posible hacer un seguimiento del fenómeno a

escala planetaria a través de medidas alejadas de las zonas directamente afectadas.

Estos datos también contribuirán al estudio de la incidencia de tormentas solares y precursores sísmicos sobre la ionosfera a través de variaciones estadísticas de las frecuencias de resonancia e incrementos no regulares de la amplitud a frecuencias de décimas de hercio. En este sentido, las variaciones medidas en las resonancias de Schumann a través de múltiples estaciones distribuidas en diferentes puntos de la Tierra podrían servir para la predicción de terremotos con antelación de días o semanas.



Vista de la estación de seguimiento.

10.2. Seguimiento de contaminantes atmosféricos

Muñoz, J. M.

Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía

Resumen

Se muestran los resultados del seguimiento de las concentraciones de SO_2 , O_3 y NO_2 en Sierra Nevada, en comparación con los datos de una estación urbana de la ciudad de Granada (Granada-Norte) disponibles en EIONET. Para los datos registrados en Sierra Nevada se ha detectado una tendencia temporal a la reducción de NH_3 y O_3 y SO_2 y la estabilización del NO_2 . Los tres contaminantes de los que se disponen datos en la estación de Granada, O_3 , NO_2 y SO_2 , presentan concentraciones que contrastan con los valores obtenidos en Sierra Nevada. Son muy evidentes las diferencias que aparecen para NO_2 y SO_2 entre la ciudad de Granada y Sierra Nevada. Después de la modelización de la concentración de cada contaminante, se ha hecho una proyección futura. En general, aunque con los datos disponibles es difícil hacer una predicción fiable a largo plazo, la concentración de los contaminantes previsiblemente van a seguir dentro de la tendencia ya detectada.

➤ Objetivos y metodología

Ante la potencial incidencia negativa de ciertos contaminantes en los ecosistemas naturales, se ha puesto en marcha un protocolo de seguimiento de la calidad del aire en Sierra Nevada.

Se ha registrado la evolución de la concentración de cuatro contaminantes atmosféricos desde 2008 hasta 2013 en cuatro puntos diferentes mediante dosímetros pasivos. Se dispone de datos previos correspondientes al periodo 2001-2004 y también de los datos de la concentración

para tres contaminantes en una estación de la ciudad de Granada (disponibles en www.eionet.europa.eu). Previo a los análisis ha sido necesario homogeneizar las series. La primera, registrada entre los años 2001 y 2004, tiene una periodicidad de sustitución del captador de 14 días y la segunda, entre 2008 y 2013, cada 15. Para la ciudad de Granada se disponía de una serie de datos de la concentración registrada cada hora.

Después se han calculado los promedios de las concentraciones en la ciudad de Granada en el mismo intervalo temporal en el que estuvieron instalados los captadores en Sierra Nevada. Una vez definidas las series se han abordado varias metodologías de análisis; regresión lineal, alisado simple, alisado doble, Stl (*Seasonal and Trend decomposition using Loess*), alisado Holt-Winters y ARIMA. Todos estas técnicas están disponible en los paquetes TSA [5], tseries [6] y forecast [7] del programa estadístico R.

➤ Resultados

Al analizar la distribución comparativa de las concentraciones (Figura 1 y 2), se observan altas concentraciones de Dióxido de Azufre (SO_2) y Dióxido de Nitrógeno (NO_2) en la ciudad de Granada con respecto a cualquier punto en Sierra Nevada, mientras que las concentraciones de ozono (O_3) muestran un patrón inverso, aunque en este caso, las diferencias entre la ciudad y Sierra Nevada son mínimas. La normativa europea considera perniciosas para los vegetales concentraciones de ozono superiores a 40 ppb (partes por billón), conocido como índice AOT40 [8-9].

Las concentraciones de NH_3 son similares en los tres puntos analizados de Sierra Nevada (Figura 2). Es un gas relacionado con las actividades humanas primarias (ganadería y agricultura). No hay datos disponibles para este gas en la ciudad de Granada.

La diferenciación entre las dos series (Figura 3) permite apreciar algunos cambios temporales. En general se ha producido una disminución en las concentraciones, pero se han mantenido las diferencias relativas que existen entre los diferentes puntos.

En concreto, la concentración de dióxido de nitrógeno (NO_2) ha aumentado ligeramente en la ciudad de Granada, manteniéndose sin cambios significativos en Sierra Nevada.

El amoníaco (NH_3) ha descendido en Sierra Nevada al igual que el ozono, que sin embargo se ha mantenido relativamente estable en Granada.

Por último, la concentración de dióxido de azufre (SO_2), ha aumentado ligeramente en los tres puntos de Sierra Nevada, mientras que en

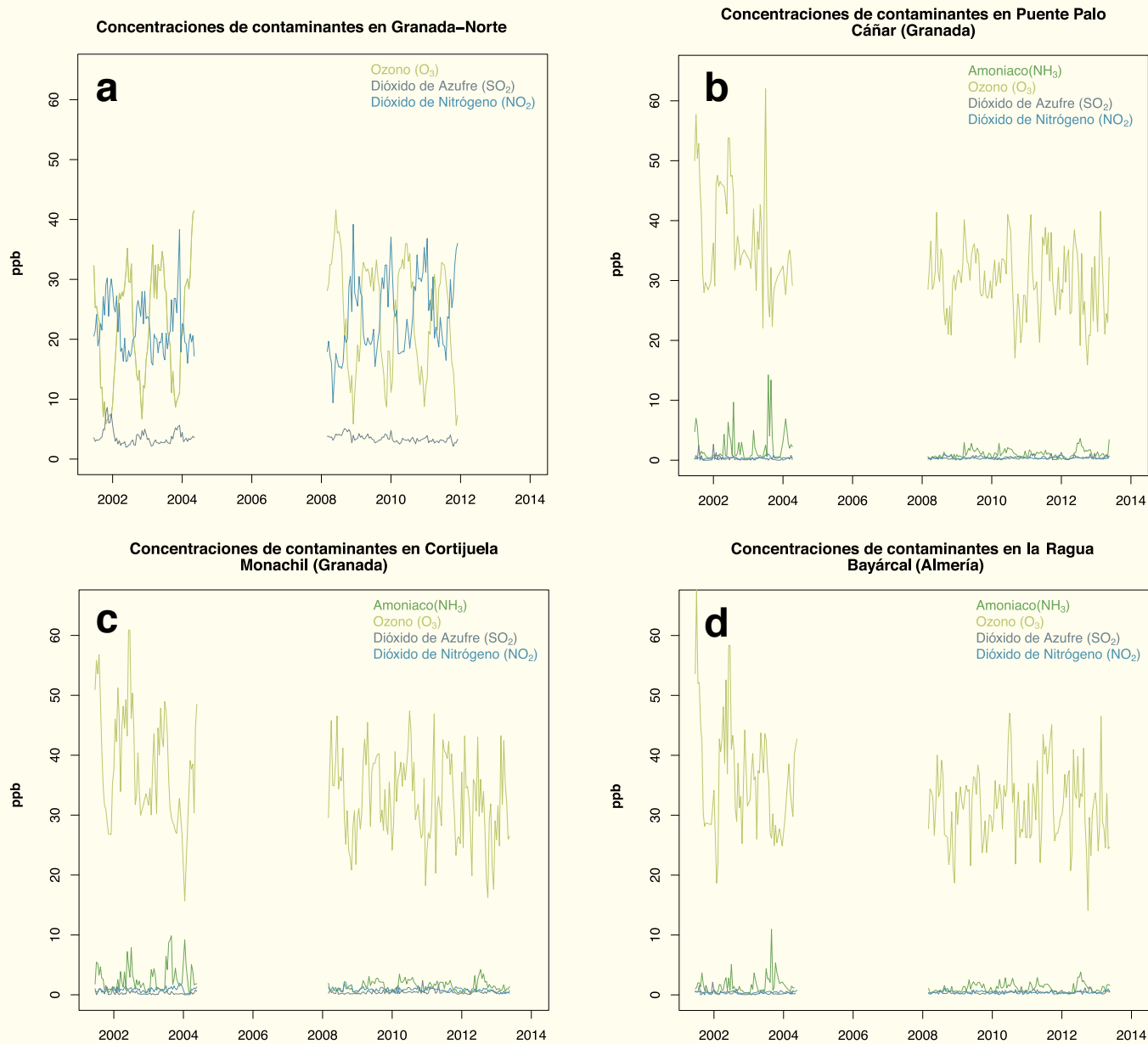
Granada se ha mantenido dentro del mismo rango de valores.

No se dispone de los datos suficientes para hacer una previsión futura fiable de la evolución

de la concentración, sobre todo sin conocer datos de las emisiones de las fuentes de cada contaminante. No obstante, una modelización preliminar de los procesos indica (Figura 4) que la mayoría presentan un comportamiento

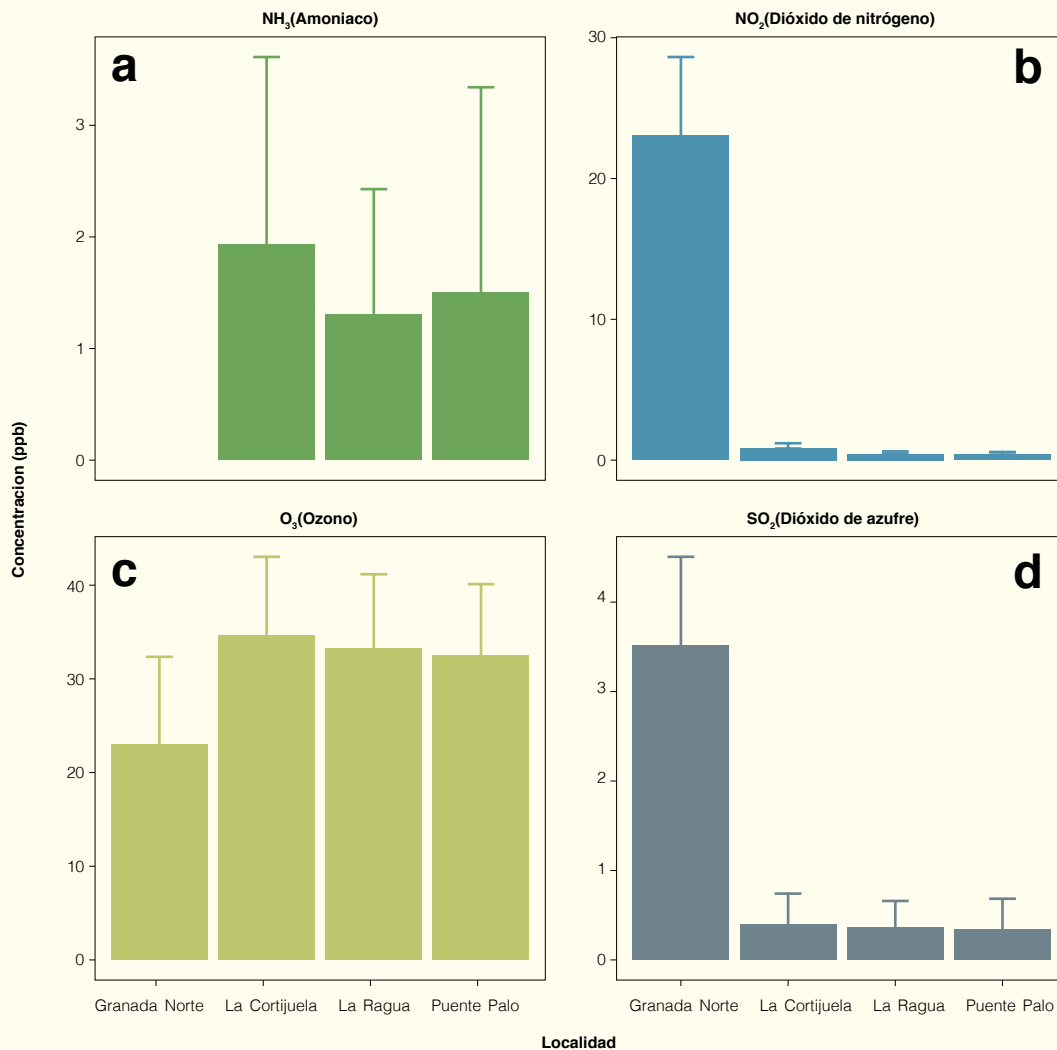
estacionario, con cierta tendencia a la disminución en los últimos años (2012 y 2013) que se ve reflejada en las proyecciones.

Figura 1



Evolución temporal de las concentraciones(en ppb) de cada contaminante en las cuatro localidades a). Estación urbana de Granada b) Puente Palo (Cañar, Granada), pinares y robledales, c) Jardín Botánico de la Cortijuela, pinares. d) La Ragua, pinares y piñonales.

Figura 2



Distribución de las concentraciones (en ppb) de cada contaminante durante el periodo 2001-2013. a). Amoníaco gaseoso (no hay datos disponibles para la ciudad de Granada). b) Dióxido de azufre, c) Ozono y d) Dióxido de Nitrógeno.

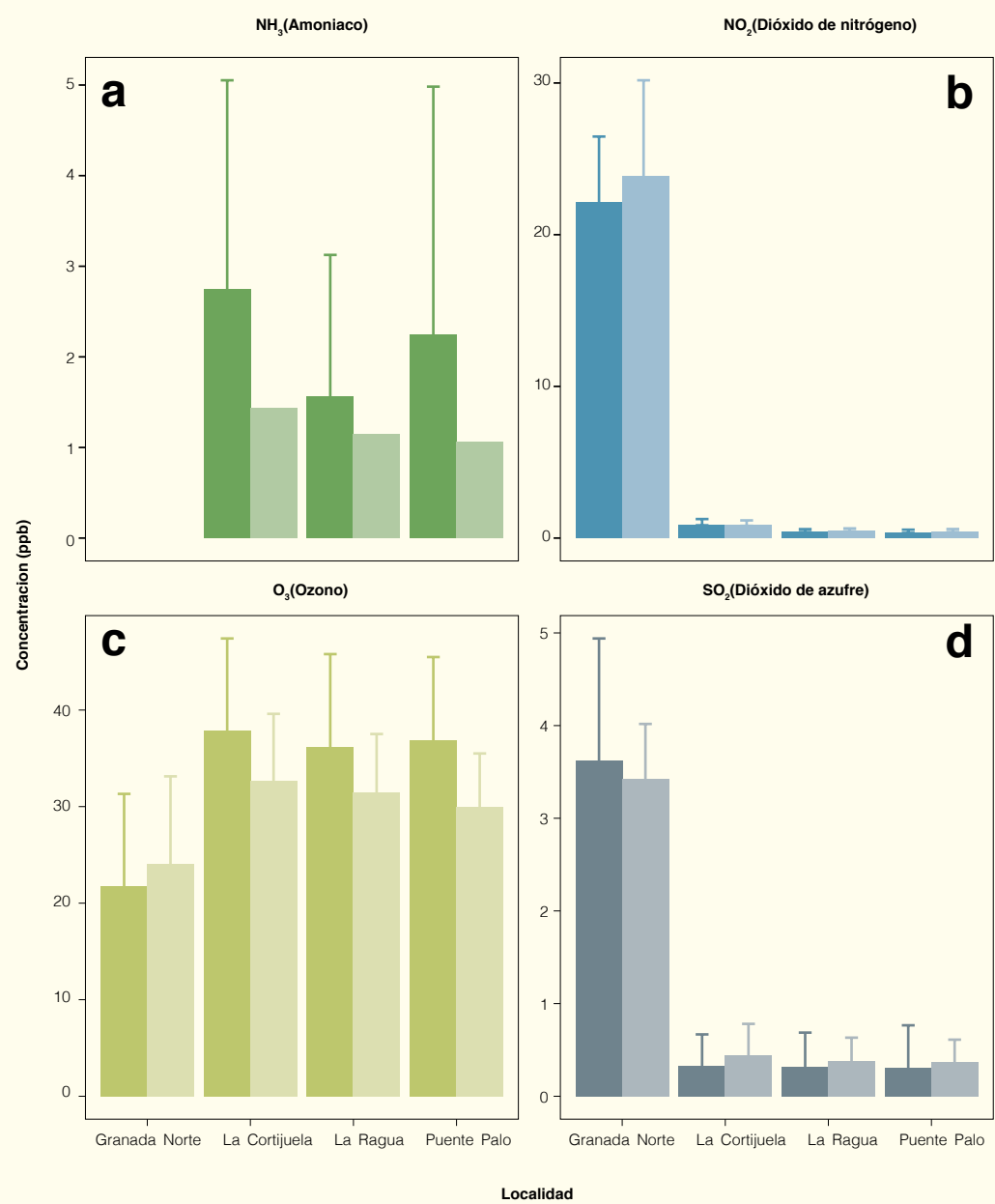
> Discusión y conclusiones

Después del tiempo transcurrido, se constata la gran diferencia en los niveles de contaminación entre el Espacio Natural de Sierra Nevada y la aglomeración urbana de Granada, sobre todo en las concentraciones de SO₂ y NO₂. Tras una eva-

luación de la evolución temporal se detecta una disminución de la concentración de NH₃ y O₃ y un aumento de SO₂ y NO₂ de los contaminantes en Sierra Nevada. Aún no se disponen de datos suficientes para hacer una previsión fiable de la

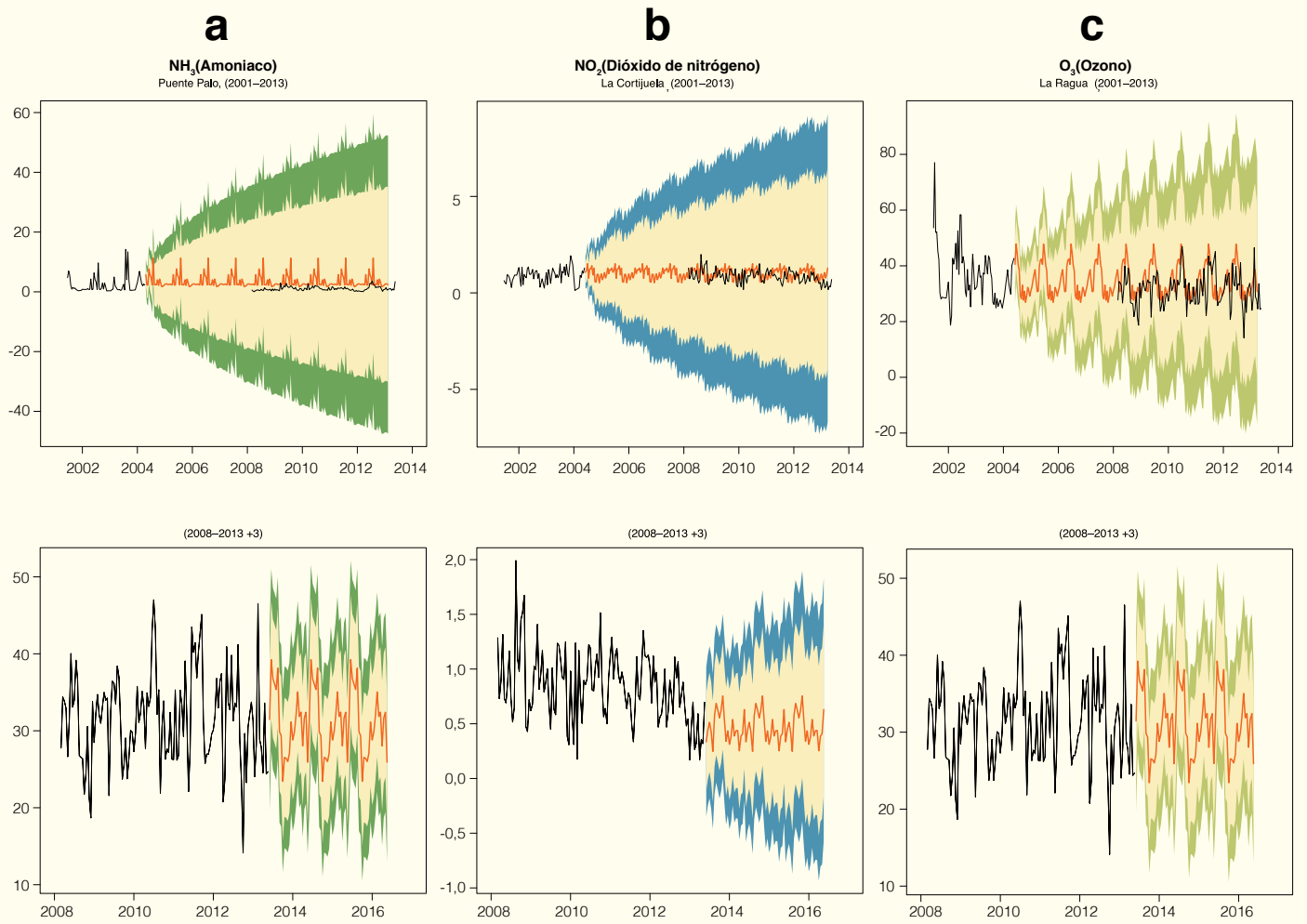
evolución futura, aunque la mayoría parece tener un comportamiento estacionario con una ligera tendencia a disminuir en la actualidad.

Figura 3



Comparativa de la distribución de las concentraciones (en ppb) para las dos series temporales (2001-2004 y 2008-2013). (a) amoníaco, (b) dióxido de nitrógeno, (c) ozono y (d) dióxido de azufre.

Figura 4



Tres ejemplos de la superposición entre los valores reales y previstos en la parte superior y de la previsión para los próximos tres años según la evolución actual de las concentraciones de amoníaco (a), dióxido de nitrógeno (b) y ozono (c).

10.3. Seguimiento de la deposición atmosférica de aerosoles en Sierra Nevada

Morales-Baquero, R.
Universidad de Granada

Resumen

La deposición de aerosoles (polvo) atmosféricos es una variable climática que no se ha tenido en cuenta hasta muy recientemente. Por tanto, el papel que juegan las deposiciones atmosféricas sobre la biogeoquímica de los ecosistemas mediterráneos no ha sido suficientemente estudiado, aunque los datos que se van obteniendo indican que el material particulado atmosférico, y en particular el polvo que proviene del Sahara, representa una de las principales entradas de nutrientes y elementos traza, entre otros componentes, a los ecosistemas del área mediterránea. En concreto, este estudio monitoriza la deposición de aerosoles en Sierra Nevada en el contexto del Mediterráneo occidental y en conexión con el cambio climático global.

➤ Objetivos y metodología

La cuantificación y variabilidad de la lluvia se ha estudiado desde hace tiempo, con series temporales fiables que abarcan décadas y una resolución espacial relativamente detallada. Por el contrario, la génesis, movilización y deposición de partículas en suspensión en la atmósfera apenas son conocidas. Las zonas áridas son las fuentes principales de aerosoles y el Sahara, la mayor de todo el Planeta, es responsable de la exportación de ingentes cantidades de polvo que se transportan por la atmósfera hacia el Atlántico y Europa.

El área mediterránea recibe vía deposición particulada atmosférica cantidades significativas de calcio, hierro y fósforo, materia orgánica

particulada y otros elementos sin fases gaseosas cuyos ciclos biogeoquímicos se han considerado tradicionalmente cerrados dentro de los ecosistemas. Por eso, existe un interés creciente en la cuantificación de estos flujos atmosféricos y la valoración de su impacto sobre los ecosistemas mediterráneos. El objetivo de la presente ficha es conseguir una serie continuada de datos de deposición atmosférica de aerosoles en Sierra Nevada que permita su estudio en relación con el cambio climático y prever su impacto sobre sus ecosistemas.

Desde el año 2001 se han recogido en Sierra Nevada muestras semanales de la deposición de aerosoles en dos series bianuales que abarcan

hasta el año 2005 con excepción del año 2003. Las muestras se obtuvieron mediante captadores pasivos automáticos que diferencian la deposición seca de aerosoles de la húmeda (la que arrastra la lluvia).

Actualmente, se continúa la recolección semanal de muestras de material particulado mediante un nuevo instrumento automático instalado en la estación meteorológica de Cañar, del Organismo Autónomo Parques Nacionales, en coordinación con la red *CHARMEX*, que se describe mas adelante.

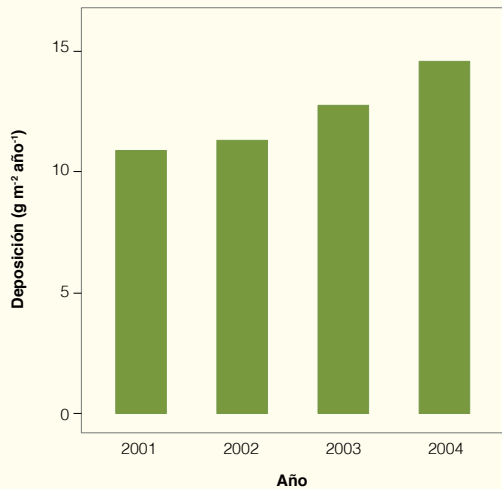
➤ Resultados

Los datos obtenidos muestran que el material particulado se deposita en más de un 70% en forma seca y sólo el restante se deposita junto con la lluvia. Este hecho refleja la singularidad del sur del Mediterráneo en relación con zonas más septentrionales del Hemisferio Norte donde la precipitación húmeda de aerosoles

es predominante. La evolución en el periodo estudiado muestra un incremento progresivo de la cantidad de material depositado, pasando de $10,9 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ en 2001 a $14,6 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ en 2005 (Figura 1). Además, se ha demostrado la influencia determinante de la deposición de carbono orgánico, fósforo, nitrógeno y calcio

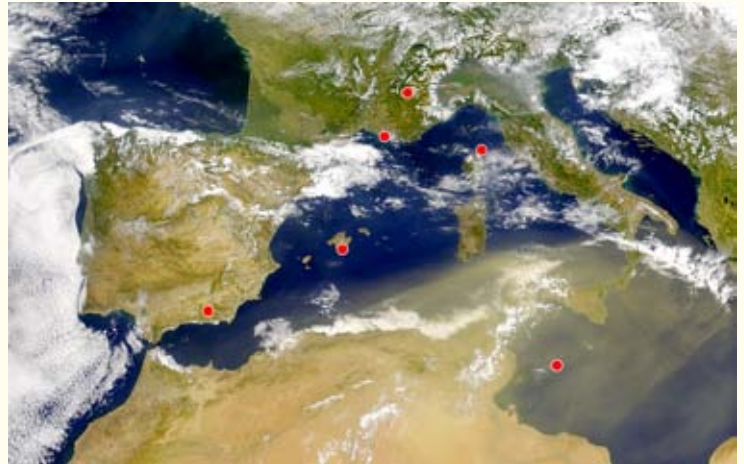
en la biogeoquímica de sistemas acuáticos de Sierra Nevada [11-14], así como es determinante la entrada de calcio sahariano en bosques mediterráneos (Montseny) [10].

Figura 1



Deposición anual de material particulado atmosférico sobre Sierra Nevada

Figura 2



Despliegue en el Mediterráneo Occidental de la red de colectores de deposición atmosférica CARAGA dentro del proyecto CHARMEX (*ChArMex/CARAGA* dust deposition network. Weekly total insoluble atmospheric deposition flux*). Provided by the SeaWiFS Project, NASA/Goddard Space Flight Center, and ORBIMAGE.

➤ Discusión y conclusiones

La tendencia observada es congruente con la evolución creciente de las emisiones de polvo sahariano hacia la región mediterránea según los cambios observados en los patrones climáticos globales. Sin embargo, los datos disponibles son demasiado escasos. Se requieren series temporales largas para relacionar la dinámica de los aerosoles y su variabilidad con las demás variables climáticas.

Dada la escasez de datos sobre los aerosoles, su estudio ha concitado el interés de la comunidad científica y así, investigadores franceses coordinados por el Prof. François Dulac (*Centre D'etudes Civils, Saclay*) han promovido una iniciativa llamada: *CHARMEX (The Chemistry-Aerosol Mediterranean Experiment)*. Este proyecto comprende un ambicioso plan de trabajo a largo plazo que tiene los siguientes objetivos generales:

- 1.- Establecer el estado actual del ambiente atmosférico del Mediterráneo.
- 2.- Cuantificar el impacto de los aerosoles y gases reactivos.
- 3.- Predecir la evolución futura de estos balances e impactos.

Los objetivos específicos comprenden una amplia gama de aspectos como el conocimiento de forzamientos radiativos, mecanismos de transporte, química atmosférica, deposición, efectos sobre los ecosistemas e influencia antropogénica.

La consecución de estos objetivos supone la integración del esfuerzo de un numeroso grupo internacional de científicos, de distintas ramas de la ciencia. Esta red está constituida en la actualidad por 7 nodos, dos de los cuales están en España: uno en Mallorca y otro en Sierra

Nevada. En cada uno de ellos se ha instalado un instrumento para la recogida de los aerosoles de forma autónoma, denominado CARAGA, desarrollado específicamente para esta red (Figura 2).

La red empezó a desplegarse en el año 2010. En Mayo de 2012 se instaló el colector autónomo en la estación meteorológica de Cañar. Durante el primer año el funcionamiento de este aparato, que es un prototipo, ha requerido diversos ajustes y la toma de muestras ha sido irregular. A partir de mayo de 2013 ya se tienen datos semanales regulares que se continúan tomando de forma coordinada con las restantes estaciones de la red *CHARMEX*. Con los datos recogidos se espera obtener información crítica para validar los ciclos y modelos de deposiciones atmosféricas a escala sinóptica, así como para conocer el papel, pasado, presente y futuro, que juegan dichas deposiciones sobre el funcionamiento de los ecosistemas mediterráneos.

Bibliografía

› Más referencias en http://refbase.iecolab.es/ref_dossier_resultados.html

10.1 Seguimiento de la actividad tormentosa en el sistema Tierra a través de la estación ELF “Juan Antonio Morente” de Sierra Nevada

- [1] Morente, J.A.; Portí, J.A.; Besser, B.P.; Salinas, A.; Lichtenegger, H.I.M.; Navarro, E.A. & Molina-Cuberos, G.J. (2006). A numerical study of atmospheric signals in the Earth-ionosphere electromagnetic cavity with the Transmission Line Matrix method. *Journal of Geophysical Research*, 111 (A10): A10305.
- [2] Toledo-Redondo, S.; Fornieles, J.; Salinas, A.; Méndez, A. & Portí, J. (2013). New ELF (Schumann resonance) measurement station in Sierra Nevada, Spain. En: *EGU General Assembly Conference Abstracts*. EGU General Assembly Austria, Viena. vol. 15.5793.
- [3] Williams, E.R. (1992). The Schumann resonance: A global tropical thermometer. *Science*, 256: 1184–1187.
- [4] González, C.S.A. (2013). *Registro y procesamiento de señales ELF: Resonancias de Schumann*. Trabajo Fin de Grado. Universidad de Granada.

10.2 Seguimiento de contaminantes atmosféricos

- [5] Chan, K.S. & Ripley, B. (2012). *TSA: Time Series Analysis, computer software*. Disponible en <http://CRAN.R-project.org/package=TSA>
- [6] Trapletti, A. & Hornik, K. (2015). *tseries: Time series analysis and computational finance, computer software*. Disponible en <http://CRAN.R-project.org/package=tseries>
- [7] Hyndman, R.J. & Khandakar, Y. (2008). Automatic Time Series Forecasting: The forecast Package for R. *Journal of Statistical Software*, 27 (3): 1–22.
- [8] European Union (2002). Council Directive 2002/3/EC relating to ozone in ambient air. *Official Journal of European Communities*, L67 (9.3.2002): 14–30.

- [9] Gerosa, G.; Ferretti, M.; Bussotti, F. & Rocchini, D. (2004). Estimates of ozone AOT₄₀ from passive sampling in forest sites in South-Western Europe. *Environmental Pollution*, 145 (3): 629–635.

10.3 Seguimiento de la deposición atmosférica de aerosoles en Sierra Nevada

- [10] Avila, A.; Alarcón, M. & Queralt, I. (1998). The chemical composition of dust transported in red rains—its contribution to the biogeochemical cycle of a holm oak forest in Catalonia (Spain). *Atmospheric Environment*, 32 (2): 179–191.
- [11] Mladenov, N.; Pulido-Villena, E.; Morales-Baquero, R.; Ortega-Retuerta, E.; Sommaruga, R. & Reche, I. (2008). Spatiotemporal drivers of dissolved organic matter in high alpine lakes: Role of Saharan dust inputs and bacterial activity. *Journal of Geophysical Research*, 113: G00D01.
- [12] Morales-Baquero, R.; Pulido-Villena, E. & Reche, I. (2006). Atmospheric inputs of phosphorus and nitrogen to the Southwest Mediterranean region: Biogeochemical responses of high mountain lakes. *Limnology and Oceanography*, 51 (2): 830–837.
- [13] Pulido-Villena, E.; Reche, I. & Morales-Baquero, R. (2006). Significance of atmospheric inputs of calcium over the Southwestern Mediterranean region: High mountain lakes as tools for detection. *Global Biogeochemical Cycles*, 20 (2): GB2012.
- [14] Reche, I.; Ortega-Retuerta, E.; Romera, O.; Pulido-Villena, E.; Morales-Baquero, R. & Casamayor, E.O. (2009). Effect of Saharan dust inputs on bacterial activity and community composition in Mediterranean lakes and reservoirs. *Limnology and Oceanography*, 54 (3): 869–879.

Autores

Domingo Alcaraz Segura

dalcaraz@ugr.es
Departamento de Botánica, Facultad de Ciencias
Universidad de Granada
Avda. Fuentenueva s/n. 18071 Granada, España
-
Departamento de Biología y Geología
Centro Andaluz para la Evaluación y Seguimiento del
Cambio Global
Universidad de Almería
Ctra. Sacramento s/n. 04120 La Cañada de San Urbano
(Almería), España

José Antonio Algarra Ávila

jalgarra@agenciamedioambienteyagua.es
Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía.
Gerencia Provincial de Granada
Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del
Territorio, Junta de Andalucía
C/ Joaquina Eguaras, 10. 18013 Granada, España

Rut Aspizua Cantón

rut.aspizua.ext@juntadeandalucia.es
Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía.
Área de Conservación, Espacio Natural de Sierra Nevada
Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del
Territorio, Junta de Andalucía
Carretera Antigua de Sierra Nevada, Km 7. 18191 Pinos
Genil (Granada), España
-
Gerencia Provincial de Granada
Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del
Territorio, Junta de Andalucía
C/ Joaquina Eguaras, 10. 18013 Granada, España

José Miguel Azañón Hernández

jazonon@ugr.es
Departamento de Geodinámica, Facultad de Ciencias
Universidad de Granada
Avda. Fuentenueva s/n. 18071 Granada, España

Elena Ballesteros Duperón

eballesterosd@agenciademedioambienteyagua.es
Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía.
Gerencia Provincial de Granada
Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del
Territorio, Junta de Andalucía
C/ Joaquina Eguaras, 10. 18013 Granada, España

José Miguel Barea Azcón

jbarea@agenciamedioambienteyagua.es
Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía.
Gerencia Provincial de Granada
Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del
Territorio, Junta de Andalucía
C/ Joaquina Eguaras, 10. 18013 Granada, España

Maribel Benítez Lechuga

mbenitez@ugr.es
Departamento de Zoología, Facultad de Ciencias
Universidad de Granada
Avda. Fuentenueva s/n. 18071 Granada, España

Cristina Bollullos Sánchez

cbollullos@agenciamedioambienteyagua.es
Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía.
Gerencia Provincial de Granada
Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del
Territorio, Junta de Andalucía
C/ Joaquina Eguaras, 10. 18013 Granada, España

Francisco Javier Bonet García

fjbonet@ugr.es
Laboratorio de Ecología del CEAMA
Instituto Interuniversitario de Investigación del
Sistema Tierra en Andalucía. Universidad de Granada
Avda. del Mediterráneo s/n. 18006 Granada, España

María Teresa Bonet García

mterebonet@gmail.com
Departamento de Historia Medieval y Ciencias y
Técnicas Historiográficas, Facultad de Filosofía y Letras
Universidad de Granada
Campus Universitario de Cartuja. 18011 Granada,
España

Francisco José Bullejos Carrillo

fjbullejos@gmail.com
Department of Biology, Center of Ecological and
Evolutionary Synthesis (CEES)
University of Oslo
P.O. BOX 1066 Blindern, 0316 Oslo, Norway

Andrés Caballero Calvo

andrescaballero@ugr.es
Instituto de Desarrollo Regional
Universidad de Granada
C/ Rector López Argüeta, s/n. 18071 Granada, España

Javier Cabello Piñar

jcabello@ual.es
Departamento de Biología y Geología
Centro Andaluz para la Evaluación y Seguimiento del
Cambio Global, Universidad de Almería
Ctra. Sacramento s/n. 04120 La Cañada de San Urbano
(Almería), España

Francisco Mario Cabezas Arcas

fmca.rfe@gmail.com
Laboratorio de Ecología del CEAMA
Instituto Interuniversitario del Sistema Tierra en
Andalucía. Universidad de Granada
Avda. del Mediterráneo s/n. 18006 Granada, España

Francisco Javier Cano-Manuel León

franciscoj.canomanuel@juntadeandalucia.es
Área de Conservación, Espacio Natural de Sierra
Nevada
Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del
Territorio, Junta de Andalucía
Carretera Antigua de Sierra Nevada, Km 7. 18191
Pinos Genil (Granada), España

Presentación Carrillo Lechuga

pcl@ugr.es
Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias
Universidad de Granada
Avda. Fuentenueva s/n. 18071 Granada, España

Jorge Castro Gutiérrez

jorge@ugr.es
Departamento de Ecología, Facultad
de Ciencias
Universidad de Granada
Avda. Fuentenueva s/n. 18071 Granada, España

José Antonio Delgado Molina

jadelmo@ugr.es
Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias
Universidad de Granada
Avda. Fuentenueva s/n. 18071 Granada, España

Francisco Domingo Poveda

poveda@eeza.csic.es
Departamento de Desertificación y Geoecología.
Estación Experimental de Zonas Áridas
Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)
Ctra. Sacramento s/n. 04120 La Cañada de San Urbano
(Almería), España

María del Carmen Fajardo Merlo

mfajardo@agenciamedioambienteyagua.es
Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía.
Gerencia Provincial de Granada
Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del
Territorio, Junta de Andalucía
C/ Joaquina Eguaras, 10. 18013 Granada, España

Jesús Fornieles Callejón

jforniel@ugr.es
Departamento de Electromagnetismo y Física de la
Materia, Facultad de Ciencias
Universidad de Granada
Avda. Fuentenueva s/n. 18071 Granada, España

Miguel Galiana García

mgaliana@agenciamedioambienteyagua.es
Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía.
Gerencia Provincial de Granada
Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del
Territorio, Junta de Andalucía
C/ Joaquina Eguaras, 10. 18013 Granada, España

Francisco Javier Galindo Parrilla

fgalindo@agenciamedioambienteyagua.es
Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía.
Gerencia Provincial de Granada
Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del
Territorio, Junta de Andalucía
C/ Joaquina Eguaras, 10. 18013 Granada, España

José María Gil Sánchez

jmgilsanchez@yahoo.es
Wilder SOUTH
Sociedad para el Estudio, Observación y Conservación
de la Biodiversidad Mediterránea
Dr. Prados Picazo 10, 4^ºB. 18230 Atarfe (Granada),
España

Antonio Gómez Ortiz

gomez@triuim.gh.ub.es
Grupo de Investigación Paisatge y paleoambients a la
muntanya mediterrània y Servei de Paisatge. Facultat
de Geografia i Història
Universidad de Barcelona
C/ Montalegre 6-8, 3^ª planta. 08001 Barcelona, España

Adela González Megías

adelagm@ugr.es
Departamento de Zoología, Facultad de Ciencias
Universidad de Granada
Avda. Fuentenueva s/n. 18071 Granada, España

Emilio González Miras

egmiras@agenciademedioambienteyagua.es
Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía.
Gerencia Provincial de Almería
Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del
Territorio, Junta de Andalucía
C/ Joaquina Eguaras, 10. 18013 Granada, España

José Enrique Granados Torres

josee.granados.ext@juntadeandalucia.es
Agencia de Medio Ambiente y Agua.
Área de Conservación, Espacio Natural de Sierra Nevada
Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del
Territorio, Junta de Andalucía. Carretera Antigua de
Sierra Nevada, Km 7. 18191 Pinos Genil (Granada),
España

Javier Herrero Lantarón

herrero@ugr.es
Grupo de Dinámica Fluvial e Hidrología
Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema
Tierra en Andalucía. Universidad de Granada
Avda. del Mediterráneo s/n. 18006 Granada, España

José Antonio Hódar Correa

jhodar@ugr.es
Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias
Universidad de Granada
Avda. Fuentenueva s/n. 18071 Granada, España

Gonzalo Jiménez Moreno

gonzaloj@ugr.es
Departamento de Estratigrafía y Paleontología,
Facultad de Ciencias
Universidad de Granada
Avda. Fuentenueva s/n. 18071 Granada, España

Yolanda Jiménez Olivencia

yjimenez@ugr.es
Instituto de Desarrollo Regional
Universidad de Granada
C/ Rector López Argüeta, s/n. 18071 Granada, España

Andrew Kowalski

andyk@ugr.es
Departamento de Física Aplicada, Facultad de Ciencias
Universidad de Granada
Avda. Fuentenueva s/n. 18071 Granada, España

María Rosa López Onieva

Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía.
Gerencia Provincial de Granada
Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del
Territorio, Junta de Andalucía
C/ Joaquina Eguaras, 10. 18013 Granada, España

Rogelio López Sanjuan

rlopezs@agenciademedioambienteyagua.es
Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía.
Gerencia Provincial de Granada
Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del
Territorio, Junta de Andalucía
C/ Joaquina Eguaras, 10. 18013 Granada, España

Javier Martín Jaramillo

jmartinj@agenciademedioambienteyagua.es
Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía.
Gerencia Provincial de Granada
Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del
Territorio, Junta de Andalucía
C/ Joaquina Eguaras, 10. 18013 Granada, España

Berta Martín López

berta.martin@uam.es
Laboratorio de Socio-Ecosistemas, Departamento
de Ecología
Universidad Autónoma de Madrid
C/ Darwin 2. Edificio Biología. 28049 Madrid, España

José María Martín Civantos

civantos@ugr.es
Departamento de Historia Medieval y Ciencias y
Técnicas Historiográficas, Facultad de Filosofía y Letras
Universidad de Granada
Campus Universitario de Cartuja. 18011 Granada,
España

Juan Manuel Medina Sánchez

jmedina@ugr.es
Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias
Instituto de Granada
Avda. Fuentenueva s/n. 18071 Granada, España

Rosa Menéndez Martínez

r.menendez@lancaster.ac.uk
Department of Biological Sciences, Lancaster
Environment Centre
Lancaster University
LA1 4YQ. Lancaster, United Kingdom

Joaquín Molero Mesa

jmolero@ugr.es
Departamento de Botánica, Facultad de Farmacia
Universidad de Granada
Campus Universitario de Cartuja. 18011 Granada,
España

Carlos Montes del Olmo

carlos.montes@uam.es
Laboratorio de Socio-Ecosistemas, Departamento de
Ecología
Universidad Autónoma de Madrid
C/ Darwin 2, Edificio Biología. 28049 Madrid, España

Rafael Morales Baquero

rmorales@ugr.es
Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias
Universidad de Granada
Avda. Fuentenueva s/n. 18071 Granada, España
-
Instituto del Agua
Universidad de Granada
C/ Ramón y Cajal, 4. 18071 Granada, España

Ricardo Antonio Moreno Llorca

ricuni@ugr.es
Laboratorio de Ecología del CEAMA
Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema
Tierra en Andalucía. Universidad de Granada
Avda. del Mediterráneo s/n. 18006 Granada, España

José Miguel Muñoz Díaz

jmmunoz@agenciamedioambienteyagua.es
Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía.
Gerencia Provincial de Granada

Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del
Territorio, Junta de Andalucía
C/ Joaquina Eguaras, 10. 18013 Granada, España

Francisco Javier Navarro Gómez-Menor

franciscoj.navarro@juntadeandalucia.es
Área de Conservación, Espacio Natural de Sierra Nevada
Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del
Territorio, Junta de Andalucía
Carretera Antigua de Sierra Nevada, Km 7. 18191
Pinos Genil (Granada), España

Irene Navarro González

irenavarrog@gmail.com
Laboratorio de Ecología del CEAMA
Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema
Tierra en Andalucía. Universidad de Granada
Avda. del Mediterráneo s/n. 18006 Granada, España

Marc Oliva Franganillo

oliva_marc@yahoo.com
Instituto de Geografia e Ordenamento do Território,
Centro de Estudos Geográficos
Universidade de Lisboa
Edifício da Faculdade de Letras, Alameda da
Universidade, 1600-214 Lisboa, Portugal

Cecilio Oyonarte Gutiérrez

coyonart@ual.es
Departamento de Agronomía
Universidad de Almería
Edificio Científico Técnico II-B, Ctra. Sacramento s/n.
04120 La Cañada de San Urbano (Almería), España

Ignacio Palomo

ignacio.palomo@uam.es
Basque Centre for Climate Change (BC3)
Alameda de Urquijo 4. 48008 Bilbao, España
-
Laboratorio de Socio-Ecosistemas, Departamento de
Ecología
Universidad Autónoma de Madrid
C/ Darwin 2, Edificio Biología. 28049 Madrid, España

José Vicente Pérez Peña

vperez@ugr.es
Departamento de Geodinámica, Facultad de Ciencias
Universidad de Granada
Avda. Fuentenueva s/n. 18071 Granada, España

Enrique Pérez Sánchez-Cañete

enripsc@ugr.es
Departamento de Física Aplicada, Facultad de Ciencias
Universidad de Granada
Avda. Fuentenueva s/n. 18071 Granada, España

Antonio Jesús Pérez-Luque

ajperez@ugr.es
Laboratorio de Ecología del CEAMA
Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema
Tierra en Andalucía. Universidad de Granada
Avda. del Mediterráneo s/n. 18006 Granada, España

Ramón Pérez Pérez

ramon@ugr.es
Laboratorio de Ecología del CEAMA
Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema
Tierra en Andalucía. Universidad de Granada
Avda. del Mediterráneo s/n. 18006 Granada, España

Carmen Pérez Martínez

cperezm@ugr.es
Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias
Universidad de Granada
Avda. Fuentenueva s/n. 18071 Granada, España

Laura Porcel Rodríguez

lporcel@ugr.es
Instituto de Desarrollo Regional
Universidad de Granada
C/ Rector López Argüeta, s/n. 18071 Granada, España

Jorge Portí Durán

jporti@ugr.es
Departamento de Física Aplicada, Facultad de Ciencias
Universidad de Granada
Avda. Fuentenueva s/n. 18071 Granada, España

Andrés Reyes Díez

areyesdiez@gmail.com
Departamento de Biología y Geología
Centro Andaluz para la Evaluación y Seguimiento del
Cambio Global
Universidad de Almería
Ctra. Sacramento s/n. 04120 La Cañada de San Urbano
(Almería), España

Silvia Rubio Rubio

srubio@agenciamedioambienteyagua.es
Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía.
Gerencia Provincial de Granada
Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del
Territorio, Junta de Andalucía
C/ Joaquina Eguaras, 10. 18013 Granada, España

Marta Sáinz Bariáin

msainzb@ugr.es
Departamento de Zoología, Facultad de Ciencias
Universidad de Granada
Avda. Fuentenueva s/n. 18071 Granada, España

Alfonso Salinas Extremera

asalinas@ugr.es
Departamento de Electromagnetismo y Física de la
Materia, Facultad de Ciencias
Universidad de Granada
Avda. Fuentenueva s/n. 18071 Granada, España

Montserrat Salvà Catarineu

salva@ub.edu
Grupo de Investigación Paisatge y paleoambients a la
muntanya mediterrània y Servei de Paisatge. Facultat
de Geografia i Història
Universidad de Barcelona
c/ Montalegre 6-8, 3ª planta. 08001 Barcelona, España

Ferrán Salvador Franch

fsalvador@ub.edu
Grupo de Investigación Paisatge y paleoambients a la
muntanya mediterrània y Servei de Paisatge. Facultat
de Geografia i Història
Universidad de Barcelona
c/ Montalegre 6-8, 3ª planta. 08001 Barcelona, España

Cristina Patricia Sánchez Rojas

cpsanchez@agenciamedioambienteyagua.es
Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía.
Gerencia Provincial de Granada
Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del
Territorio, Junta de Andalucía
C/ Joaquina Eguaras, 10. 18013 Granada, España

Penélope Serrano Ortiz

penelope@ugr.es
Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias
Universidad de Granada
Avda. Fuentenueva s/n. 18071 Granada, España

Alberto Tinaut Ranera

hormiga@ugr.es
Departamento de Zoología, Facultad de Ciencias
Universidad de Granada
Avda. Fuentenueva s/n. 18071 Granada, España

Manuel Villar Argaiz

mvillar@ugr.es
Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias
Universidad de Granada
Avda. Fuentenueva s/n. 18071 Granada, España

Carmen Zamora Muñoz

czamora@ugr.es
Departamento de Zoología, Facultad de Ciencias
Universidad de Granada
Avda. Fuentenueva s/n. 18071 Granada, España

Regino Jesús Zamora Rodríguez

rzamora@ugr.es
Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias
Universidad de Granada
Avda. Fuentenueva s/n. 18071 Granada, España
-
Laboratorio de Ecología del CEAMA
Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema
Tierra en Andalucía. Universidad de Granada
Avda. del Mediterráneo s/n. 18006 Granada, España

Índice de términos

- Abastecimiento de agua: 181, 182
Acentor alpino: 107, 108
Acentor común: 107
Acequia: 16, 47, 58, 61-63, 79, 171
Adenocarpus decorticans: 128, 156
Adicella reducta: 75
Aegithalos caudatus: 106
Aerosoles: 16, 81-86
Agapetus fuscipes: 74, 75
Agapetus sp.: 74, 75
Agricultura: 88, 182, 193
Águila azor-perdicera: 93, 109-112
Águila real: 92, 93, 109-112
Albergue universitario: 39
Aldeire: 62
Algas mixotróficas: 69, 814, 83
Allogamus mortoni: 75
Almería: 63, 109, 182, 183
Alpujarra: 55, 57, 116, 153
Alquife: 62
Alytes dickhilleni: 102, 103
Amoniaco: 193, 195-197
Análisis diacrónico: 54, 126, 184
Anfibio: 13, 15, 93, 102-105, 124
Annitella esparaguera: 75
Annitella iglesiasi: 74, 75
Anomalopterygella chauviniana: 75
Anphinemura triangularis: 76
Anthyllis cytisoides: 128, 129
Aporia crataegi: 131, 132
Arenaria nevadensis: 97, 100
Arrendajo: 106, 107, 168, 170, 171
Asimilación de carbono: 139, 144-146
Asteraceae: 94
Asturias: 78
Athripsodes albifrons: 74-75
Athripsodes sp.: 74
Atlas histórico forestal de Andalucía: 58
Aves dispersantes: 13, 165, 168, 178
Bacterias: 81, 82
Balance de carbono: 144, 146
Berberis hispanica: 129, 156, 157
Bienestar: 16, 181, 182, 184, 185
Bivalvia: 76
Borreguil de San Juan: 126, 134
Borreguiles de la Virgen: 48, 50
Brachycentrus maculatum: 74, 75
Brassicaceae: 94
Bubas bubalus: 92
Bubión: 62
Bufo calamita: 102
Bufo spinosus: 102, 103
Busquistar: 62
Cabra montés: 14, 17, 113-116, 168
Cájar: 62
Cálcio: 198
Calidad del aire: 182, 193
Cámara de seguimiento de la nieve: 36
Cambio climático: 11, 15, 20, 32, 34, 44, 49, 56, 75, 104, 118, 124, 126, 132, 133, 138, 144, 148, 150, 158, 162, 165, 167, 170, 171, 174, 176, 189, 190, 192, 198, 181, 182
Cambio global: 8-12, 15, 16, 20, 22, 25, 29, 32, 33, 46, 52, 57, 60, 63, 68-70, 72, 73, 77, 81, 83, 84, 88, 92, 93, 102, 106, 107, 131, 140, 148, 150, 151, 156, 162, 167, 168, 170-172, 180, 183, 184, 189, 192
Cambios socio-ecológicos: 57
Cáñar: 12, 13, 26, 56-58, 60, 62, 168, 170, 194, 198, 199
Capileira: 62
Capnia nigra: 76
Capnioneura mitis: 76
Carbono: 11, 13, 17, 81, 82, 138-140, 142, 144-146, 156, 158, 198
Carduelis cannabina: 106
Carduelis carduelis: 106
Caryophyllaceae
Catastro Marqués de la Ensenada: 58
Caudal: 16, 35, 61, 63, 68-72, 75
Censo Andaluz de Pesca: 78
CHARMEX (The Chemistry-Aerosol)
Chloroperla nevada: 76
Chova piquigualda: 108
Chullo: 130
Ciclo hidrológico: 10, 32, 34, 47, 63, 70
Ciclo térmico: 70
Ciliados: 82
Clara/clareo: 151, 152, 154, 165, 166, 168-170, 172
Clases de Edad (Trucha común): 78-80
Clorofila-a: 47, 51-53, 87
Cogujada montesina: 107
Coleoptera: 74, 75
Coleópteros coprófagos: 92, 93, 118, 119
Colirrojo tizón: 106-108
Collalba gris: 107
Competencia interespecífica: 102, 112
Competencia: 102, 105, 112, 154, 162, 163, 165, 169, 172
Coníferas: 55, 64, 65
Conocimiento científico: 8-10, 148, 181, 182
Consumidores 81, 82, 84, 86, 88
Contaminantes: 188, 189, 193-195
Control de la erosión: 182
Corral del Veleta: 33, 37-40
Corrientes de derrubios: 174-176
Cortafuegos: 153
Cortijuela: 161, 194-196
Crataegus monogyna: 129, 156, 157
Creta: 95
Cubierta de nieve: 10, 17, 32, 33, 35, 41-44
Cuerpos helados: 37-38
Cueva de la Carihuela: 49
Cultivos: 17, 47, 54-60, 63-65, 138, 149, 165, 167-170
Cultura 58, 180, 181, 184
Curruca carrasqueña: 106
Curruca zarcera: 106
Cytisus oromediterraneus: 128
Decaimiento forestal: 150, 156, 159
Deposición atmosférica: 198, 199
Depredadores: 105, 160, 161
Deshielo: 39, 71, 83
Deslizamientos superficiales: 150, 174, 176
Día de máxima floración (o DMF): 126, 128, 129
Diccionario geográfico Madoz: 58
Diccionario geográfico Miñano: 58
Diccionario geográfico Tomás López: 58
Dinocras cephalotes: 76
Dióxido de azufre: 193, 195, 196
Dióxido de nitrógeno: 193, 195-197
Diptera: 74-76
Discoglussus jeanneae: 102, 103
Disponibilidad hídrica: 102, 124, 126, 170
Dólar: 62
Dosímetros pasivos: 193
Duración de la floración: 126
Duración de la nieve: 33, 41-44, 143, 174, 175
Economía: 182, 184
Ecoturismo: 182
Eddy Covariance (torres): 138, 144
Educación: 184
El Niño: 192
ELF (*Extremely Low Frequency*): 188, 190-192
Eliminación de residuos: 152
Empleo: 153, 154, 184
Encinar: 13, 15, 47, 54, 55, 58, 59, 64, 139, 140-142, 149
Enebral: 13, 15, 55, 106, 107
Enfermedades emergentes: 10, 93, 102, 113, 116
Enfermedades infecciosas vectoriales: 116
Enfermedades zoonóticas: 116
Engelamiento: 39
Ephemeroptera: 74, 76
Erinacea anthyllis: 129
Erosión: 146, 180, 182
Eryngium glaciale: 93, 95
Escocia: 95
Especies criofílicas: 95
Esquí: 34, 44, 55, 182, 183
Estación de medida ELF “Juan Antonio Morente”: 188, 190, 192
Estación meteorológica de la Piedra de los Soldados: 29, 131
Estación meteorológica de la Rambla de Guadix: 13, 131
Estación meteorológica del Aljibe de Montenegro: 13, 131
Estación meteorológica del Embarcadero del Camarate: 131
Estación meteorológica del Encinar: 13, 131
Estaciones de Monitoreo Intensivo (EMI): 12-14.
Estrategia andaluza ante el Cambio Climático: 138
Europa: 8, 88, 94, 95, 138, 198
EVI (Índice de Vegetación Mejorado): 138-142
Éxito reproductor: 102, 105
Factores físico-químicos: 68, 70, 72, 84
Fecha media de vuelo: 131, 134
Fechade inicio de la innivación: 33, 41, 42
Fenofases: 132
Fenología: 13, 77, 104, 118, 124-128, 130-132, 138-140, 150, 168
Fin de la floración: 126, 127
Fitoplancton: 81, 84-86, 189
Flujo de carbono: 11, 13, 82, 138
Formica fusca/lemanii: 92, 118-120
Fósforo: 69, 81, 82, 84, 86-88, 189, 198
Fotosíntesis: 47, 81, 145, 146
Freza de trucha común: 78, 80
Fructificación: 124, 128, 167
Fuente de CO₂: 144, 146
Galerida thecklae: 106
Garrulus glandarius: 106, 168
Gastropoda: 75, 76
Genista umbellata: 128
Genista versicolor: 126, 156
Gentiana lutea: 97-101
Gestión adaptativa: 10, 11, 148, 151, 170
Gestión forestal: 13, 149, 151-154, 167, 168
Glaciar: 33, 37-40, 68, 69, 89, 109, 112, 176
GLORIA (GLObal Observation Research Initiative in Alpine environments): 13, 94
Glossosoma boltonii: 74, 75
Gorrión alpino: 108
Granada: 40, 55, 57, 63, 78, 80, 109, 110, 161, 173, 182, 183, 189, 193-196
Halcón peregrino: 109-111
Halesus tessellatus: 74, 75
Herbivoría: 97, 101, 146, 156, 168-170
Herbívoros: 48, 81, 84, 86, 88, 101, 158
Heteroptera: 75, 76
Hierro: 198
Himenópteros: 92, 118, 119
Hirudinea: 76
Holoceno: 48, 49
Hueneja: 62
Huétor Vega: 62
Hydropsyche incognita: 75
Hydropsyche infernalis: 74, 75
Hydropsyche instabilis: 75
Hydropsyche pellucidula: 74, 75
Hydropsyche tibialis: 75
Hydroptila vectis: 75
Hyla meridionalis: 104
Hyponephele lycaon: 132
Incendio forestal: 10, 13, 50, 50, 58, 138, 139, 144, 146, 149-151, 153-156, 158, 165
Índice de bienestar: 181, 185
Índice de Gestión Forestal: 152-154
Índice de termicidad: 94
Índice de termofilización: 94-96
Infestación experimental: 113
Inicio de la floración: 126, 127
Insetabilidad de ladera: 174-176
Instituto Andaluz de Estadística: 58
Instituto Nacional de Estadística: 58
Inventario forestal: 64, 163
IPBES (Panel Intergubernamental sobre Biodiversidad y Servicios de los Ecosistemas): 182
IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático): 20, 25
Jabalí: 113, 114, 116, 168, 170
Jerez del Marquesado: 62
Jilguero: 106
Juego de Bolos: 120
La Calahorra: 62
La Ragua: 44, 119, 161, 194-196
La Tahá: 62
La Zubia: 62
Laguna Cuadrada: 52, 53
Laguna de Aguas Verdes: 52, 53, 68, 70, 118
Laguna de Juntillas: 89
Laguna de la Caldera: 69, 70, 81-88, 120
Laguna de la Mula: 48-50.
Laguna de Río Seco: 39, 48-53, 70, 118
Laguna Larga: 70, 71, 118
Laguna Seca: 13, 131, 132, 134, 135
Lamiaceae: 94

- Lanteira: 62
Laserpitium longiradium: 97, 98, 100
 Lavaderos de la Reina: 185
 Lecrín: 153
Lepidium stylatum: 95
 Lepidoptera: 76
 Lepidópteros: 15, 118, 119
Lepidostoma basale: 75
Leuctra andalusiaca: 76
Leuctra fusca: 76
Leuctra iliberis: 76
Leuctra inermis: 76
Leuctra maroccana: 76
 Libro de apeo y repartimiento: 58
Limnephilus obsoletus:
 Loma de Lanjarón: 146
Lullula arborea: 106
Luzula hispanica: 94
Lycaena alciphron
 MA (Evaluación de los Ecosistemas del Milenio): 182
 Macroinvertebrados: 13, 16, 68, 69, 73, 74, 78
 Madera quemada: 144, 146, 149, 150, 156, 158
 Mapa catastral: 58
 Mar de Alborán: 49, 188
 Mariposa apolo: 92, 125, 131, 132, 134
 Marquesado del Zenete: 62, 116, 152, 153, 162
 Mediterráneo: 8, 24, 36, 44, 47, 57, 61, 64, 87, 95, 106, 138, 139, 142, 144-146, 148, 153, 176, 198, 199
Mediterranean Experiment: 198, 199
Melanargia lachesis: 124, 132
 Mesocosmos: 81, 82, 84-86
Mesophylax aspersus: 74, 75
 Metamórfico: 102, 103, 105
 MHC (Complejo Mayor de *Histocompatibilidad*): 113
Micrasema longulum: 75
Micrasema moestum: 74, 75
 MIGRAME (Migración Altitudinal y Colonización de hábitats degradados en montañas mediterráneas): 168
 Mirlo: 106, 107
 Mito europeo: 106
 Mixotrófia: 81
 Modelos climáticos: 8, 25, 26
 Monachil: 12, 62, 150
Montifringilla nivalis: 108
 Montseny: 198
 Mosquitero común: 107
 Mosquitero papialbo: 106
 Motores de cambio: 56, 107
 Mulhacén: 39, 97, 98, 100, 188
 NAO (Oscilación Atlántico Norte): 24, 44, 50, 139, 142, 160
 Naturalización: 162-166
 NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*): 149, 150, 174, 175
 Nigüelas: 153
 Nitrógeno: 81, 88, 189, 198
 Noruega: 39, 78, 80
 OAPN (Organismo Autónomo de Parques Nacionales): 9, 29, 62, 168, 198
 Observatorio del Cambio Global de Sierra Nevada: 8, 9, 11, 15, 16, 22, 25, 33, 131, 162
 Ocio: 56, 184
 Odonata: 75, 76
Oenanthe oenanthe: 107
 Oligochaeta: 76
Oriolus oriolus: 106
 Oromediterráneo: 144-146
 Oropéndola: 106
 Ozono: 193, 195-197
 Po (Umbral de escorrentía superficial): 175
 Paisajes culturales: 61
 Pampaneira: 62
 Pardillo: 107, 108
Parnassius apollo: 118, 119, 132
 Parque Natural de las Sierras de Cazorla, Segura y las Villas: 114
 Participación social: 9, 184
 Pastos: 47, 56, 61, 63-65, 149, 165
 Patógenos: 113, 114, 116
 Patrimonio Forestal del Estado: 153
Pelodytes ibericus: 104
Pelophylax perezii: 102
 Pequeña Edad del Hielo: 37
 Perfiles de floración: 126, 127
 Periglaciario: 39, 40
Perla grandis: 76
Perla marginata: 74, 76
Perolodes microcephalus: 76
 Permafrost: 33, 37-40
Philopotamus montanus: 74, 75
Phoenicurus ochurus: 106
Phyloscopus bonelli: 106
Picus viridis: 106
Pilosella castellana: 93, 95
Pilosella: 95
 Pinares de repoblación: 12, 13, 15, 17, 47, 55, 59, 64, 65, 139, 140, 149, 150, 155, 161-163, 165, 167-169, 171, 172
Pinus halepensis: 154, 156
Pinus nigra: 154
Pinus pinaster: 59, 154
Pinus sp.: 48, 50, 141, 156, 157
Pinus sylvestris subsp. *nevadensis*: 55, 139
Pinus sylvestris: 139, 140-142, 154, 163, 172
Pinus uncinata: 59
 Piñal: 13, 97, 106, 194
 Pito real: 106
 Plagas: 10, 150, 156, 158, 159, 163, 170, 171
Plantago radicata: 93, 95
Plantago: 95
 Plecoptera: 74-76
Plectrocnemia conspersa: 75
Plectrocnemia geniculata: 75
Poa minor: 94
 Poaceae: 48, 94
 Poda: 151, 152, 154, 167
Polycentropus kingi: 75
 Pórtugos: 62
Potamophylax latipennis: 75
 Precipitación: 8, 16, 20-28, 32, 33, 36, 44, 49, 50, 52, 53, 69, 73, 75, 77-79, 93, 107, 109-112, 116, 125, 128-131, 139, 140, 144, 146, 148, 156, 149, 174, 176, 198
 Presión antrópica: 58
 Presión hidrostática: 70
 Procesionaria del pino: 13, 149, 150, 159-161
 Productividad: 17, 93, 109-112, 116, 138-140, 142, 143
 Productores primarios: 81, 88
Prormica longiseta: 92, 118-120
Protobenura alcazaba: 76
Protobenura meyeri: 76
 Protocolo de Kioto: 138
Prunella collaris: 108
Prunella modularis: 107
Prunus avium: 128
Prunus dulcis: 128
Prunus ramburii: 156, 157
 Puente Palo: 194-196
Pyrhocorax graculus: 108
 Quercíneas: 55, 64, 65
Quercus ilex: 64, 157
Quercus pyrenaica: 55, 139, 140, 143, 150, 167, 168, 172, 173
Quercus sp.: 12, 47, 48, 50, 55, 64, 156, 163, 165, 169
 Quitridiomycosis: 102, 104
 Radiación ultravioleta: 69, 81, 82, 188
 Rana común: 93, 102, 104
 Reclutamiento: 78, 97, 101, 149, 158, 164, 165, 170, 171
 REDIAM (Red de Información Ambiental, Junta de Andalucía): 77
 Regulación climática: 181-183
 Regulación hídrica: 72, 181, 182
Regulus ignicapillus: 106
 Renta: 61, 163, 184
 Repoblaciones forestales: 14, 54, 64, 65, 149-154, 158, 162, 165, 168, 170, 171
 Resalveo: 152, 154, 167
 Resistencia: 10, 11, 188
 Resonancias de Schumann: 189, 190, 192
 Restauración: 150, 151, 154-158, 183
Retama sphaerocarpa: 128
 Retardo altitudinal: 132, 133
 Reyzeuelo sencillo: 106
Rhyacophila meridionalis: 74, 75
Rhyacophila munda: 75
Rhyacophila nevada: 74, 75
Rhyacophila occidentalis: 75
 Río Alhorrí: 71
 Río Andarax: 70, 73, 74, 76
 Río Castril: 78, 80
 Río Chico: 56, 60
 Río Dilar: 71, 72
 Río Dúrcal: 143
 Río Genil: 34, 35, 71, 79, 143
 Río Guadalfeo: 34, 58, 63, 79
 Río Lanjarón: 175
 Río Monachil: 62, 71
 Río Torrente: 79
 Río Trevelez: 35, 36, 71
 Río Veleta: 68
 Robledal: 13, 15, 54-56, 58-60, 106-108, 139-143, 148-150, 167-172, 194
Rosa canina: 156-158
 Roza (de matorral): 152
 Sabinar: 106
 Sáhara: 69, 88, 189, 198
 Salud (humana): 9, 116, 161, 184
 San Juan: 39, 118, 119, 126, 134, 168, 170
 Sapo pintojo: 93, 102, 104, 105
 Sapo común: 93, 102, 104
 Sapo corredor: 93, 102, 104
 Sapo partero bético: 93, 102, 103, 104
 Sarcopitosis: 114, 116
 Sarna sarcóptica: 113, 114
 Satélite *Earth probe*
 Satélite MODIS: 13, 33, 41, 44, 140
 Satélite Nimbus: 84
 Satélite: 12, 13, 33, 41, 84, 138, 140, 175
Saxicola rubicola: 106
Saxifraga nevadensis: 95
Saxifraga: 95
 Scarabaeoidea: 118
 Seguimiento nieve in situ: 33, 34, 36
Senecio nevadensis: 97, 101
 Sequía: 34, 48, 49, 68, 78, 79, 148, 163, 169, 170
Sericostoma vittatum: 74, 75
Serratella ignita: 74
 Servicio Hidrológico Forestal: 153
 Servicios culturales: 180
 Servicios de abastecimiento: 180, 181
 Servicios de regulación: 180, 181
 Servicios ecosistémicos: 9, 15, 33, 34, 44, 56, 60, 61, 180, 181, 185
 Sinfonevada: 64
 Sistema de información: 11, 12, 62, 175, 182, 184
 Sistemas acuáticos: 15, 16, 33, 53, 63, 68, 70, 72, 73, 75, 88, 198
 Sistemas históricos de regadío: 61
Sitta europea: 106
 Socioeconómico: 8, 10, 13, 57, 116, 148, 180, 181, 184, 185
 Soportujar: 58, 62
Stenophylax nycterobius: 75
 Suelo: 33, 37-40, 60, 62, 63, 94, 95, 101, 144-146, 150, 153, 158, 163, 165, 166, 171, 176
 Sumidero de carbono: 17, 138
 Sumideros de CO₂: 138, 144
 Supramediterráneo: 144-146
 Susceptibilidad frente a deslizamientos y/o desprendimientos: 174-176
Sylvia cantillans: 106
Sylvia communis: 106
Sylvia conspiciat: 106
Taeniopteryx hubaulti: 76
 Tarabilla: 106
 Tasa de reemplazo: 106, 107
 TEEB (Economía de los Ecosistemas y Biodiversidad): 182
 Teledetección: 84, 138, 140
 Temperatura del agua: 53, 68-72, 102, 104, 105
 Temperaturas máximas: 21, 23-28, 132
 Temperaturas medias: 29, 40, 131, 159
 Temperaturas mínimas: 21, 22, 24-28, 132
 Tendencias poblacionales: 13, 92, 161
 Termicidad: 94, 109
 Termomediterráneo: 144-146
 Termometría: 40
Thaumatococcus pityocampa
 Tinodes assimilis: 75
 Tomografía eléctrica: 38
 TOMS-NASA: 84, 85
 Totovía: 106
 Tratamientos selvícolas: 14, 151, 154, 163, 169
 Trepador azul: 106
 Treparriscos: 108
 Trevelez: 35, 36, 46, 62
 Trichoptera: 73-76
 Tricladida: 76
Trifolium pratense: 126
Trifolium repens: 126
 Trucha común: 13, 68, 69, 77-80
Trychodroma muraria: 108
 Turbera del Padúl: 49
Turdus merula: 106
Ulex parviflorus: 156
 Última fecha con presencia de nieve: 42, 44
 Ungulados: 113, 158, 168
 Unidades suministradoras de servicios: 182, 183
 Usos de suelo: 43, 47, 54-57, 58, 60, 64, 65, 93, 107, 148, 150, 151, 163-165, 170, 174-176, 181, 188
 Valores estéticos: 182, 183
 Veleta: 4, 12, 28, 33, 39, 40, 100, 118
Vella spinosa: 129
Viola crassiuscula: 95
 WiMMed: 33-35
Wormaldia occipitalis: 74, 75
 Zooplancton: 69, 81, 83-87



Agradecimientos

Jorgina Acebedo Puga, Javier Alba Tercedor, Jorge Alcaina Núñez, Javier Alcalá Mejías, Lola Álvarez Ruiz, Manuel Álvarez Vidaña, Fanny Archila Gallegos, Asunción Arias Navarro, Antonio Ignacio Arroyo Martínez, Ayuntamiento de Cãnar, Miguel Ángel Arrufat Jiménez, Vicente Agustín Vacas, Enrique Ávila López, Angel Bañuelos Arroyo, Jesús Bautista Rodríguez, Blas Benito de Pando, Damián Bernabé Ruiz, Verónica Bueno de la Rosa, Nuria Bonada Caparrós, Jaime Bosch Pérez, Verónica Bueno de la Rosa, Iván Caparrós Gómez, Sofía Capellán Morata, Manuela Cárdenas Fernández, Javier Carretero Rodríguez, M^a Teresa Carreto Díaz, Leticia Carrillo Olivencia, Francisco Casado Felipe, Manuel Casares Porcel, Fernando Castro Ojeda, Felipe Cejudo Peregrina, Lola Chaves Fernández, Ignacio Cifrián Casuso, Francisco J. Contreras Parody, Sara Cordón Quintana, Ana Isabel Cortés Vizcaíno, Raúl Cutando Molina, Cristina Deben Duarte, Miguel Ángel Díaz Puga, Francisco Donaire Sánchez, Alejandro Esteban Álvarez, M^a Rosa Fernández Calzado, Juan Ramón Fernández Cardenete, Alejandra Fernández Zambrano, Julián Fuentes Carretero, Rosa Fuentes Justicia, Pablo Galdo y de Fuentes, César García Carmona, Antonio Luis García García, Jorge Garzón Gutiérrez, Antonio Gómez Hervás, Carlos Gómez Ribero, Marcos Andrés González González, Patricia González Díaz, Pablo González Moreno, Ana González Robles, María de los Reyes González-Tejero García, Mariano Guerrero Serrano, David Gutiérrez García, Antonio José Herrera Martínez, Nuria Ibartz Muela, Oliver Izquierdo Amaruch, Natividad Jiménez Hernández, Vanessa Joglar Quesada, Emilia Juárez Alcaráz, M^a del Mar Lara López, José Enrique Larios López, Gonzalo Lastra Ruiz, Jenaro Leal García, M^a Ángeles Lizana Calvo, José López Pérez, Alejandro López García, Angel José Lozano Rubio, Ana Belén Lucha Ramírez, Ignacio Maldonado Lozano, Juan Carlos Maldonado Sánchez, Nerea Markina Lizárraga, Rocío Márquez Ferrando, Elías Martínez Ortiz, Fracisco Martínez Barragán, Benito Martínez Corral, Mónica Sandra Martínez Villalta, Juan Gabriel Martínez Suarez, Cristina Martos García, Enriqueta Martos Nieto, José Medialdea León, Miguel Angel Mesa Garrido, Francisco Megías Puerta, Miguel Ángel Mesa Garrido, Abderrahmane Merzouk, Adriá Miralles Nuñez, José Luis Molina, Almudena Molina Fernández, Conrrado Moratalla Vilchez, Francisco Moreno Martín, Marina Morente Díaz, Benito Manuel Martínez Corral, Julian Morillas Fernández, Daniel Morillas Fernández, Beatriz Moya Miralles, Antonia Muela Romero, Gonzalo Muñoz Pedraza, Cesc Múrria Farnós, Fco. Javier Olivares Villegas, Miguel

Olvera Rodríguez, José Ignacio Ortega Pérez, Susana Ortíz San, Manuel Otero Pérez, Manuel Pacheco Romero, David Palacios Estremera, Fernando Pavón Rubiano, Manuel Pelegrina del Río, Ana María Pello Rodríguez, José Luis Pimentel Sánchez, José Pino Díaz, Virginia Pividal García, Javier Planas Freixas, Juan Manuel Pleguezuelos Gómez, Rodrigo Pleguezuelos Gómez, Amparo Puente López, Isidro Puga Gonzalez, Carmen Pulido Poyal, Beatriz Quijada Escobar Antonio Ramos Lafuente, Blanca Ramos Losada, Manuel Romero Ortíz, José Juan de Sanjosé Blasco, Pablo S. Reyes-Muñoz, Alberto Ríos Bazán, Juan Reyes Moreno, Antonio Rodríguez Dueña, Antonio Rodríguez Huete, Francisco Robles Sánchez, Juan de Dios Rodríguez Cáceres, Josefa Rodríguez Infante, Virginia Rodríguez Salas, David Román Faura, Manuel Román Sánchez, Ángeles Rubio Rubio, Helena Ruíz Carbayo, Helena Ruíz González, Mario Ruiz Girela, Sergio Ruiz Verdú, Carmen Elisa Sáinz Cantero, Agustín Salaberri Robles, Antonio Sánchez Anguita, Apolo Sánchez Lao, Pedro Sánchez Martínez, Olivia Sanllorente Bolinches, Mariola Silvestre Granda, Ernesto Sofos Naveros, Juan José Soler Cruz, Fábio Suzart de Albuquerque, Luis Miguel Tanarro García, Miguel Tejedo Madueño, José Manuel Tierno de Figueroa, Aurelio Torres Almanchel, Jesús Vallejo Salvador, Magdalena Vara Ocón, Ángel Vélez Vélez, Antonio Veredas Navarro y Beatriz Villagómez Antequera.

El programa de seguimiento y gestión de la información del Observatorio del Cambio Global de Sierra Nevada ha sido financiado por la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, Junta de Andalucía (con la cofinanciación de los fondos FEDER de la Unión Europea), el Organismo Autónomo Parques Nacionales, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, y la Fundación Biodiversidad. Los trabajos realizados en Sierra Nevada por los grupos de investigación de Universidades y CSIC han sido financiados fundamentalmente por la Junta de Andalucía, Consejería de Innovación, el Organismo Autónomo Parques Nacionales, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, la Subdirección General de Proyectos de Investigación, Ministerio de Economía y competitividad (MINECO), así como por Proyectos Europeos de los diferentes Programa Marco. Para más detalles sobre la financiación de los grupos de investigación, se deben consultar las publicaciones originales que se citan en los diferentes capítulos.



Colaboran:



IISTA

Instituto Interuniversitario de Investigación
del Sistema Tierra en Andalucía



Laboratorio de Ecología del CEAMA.
Universidad de Granada



Fundación Biodiversidad

