

Uniendo macro y microclima en paisajes de montaña: una aproximación conceptual e instrumental

Regino Zamora^{1,2,*} , Antonio J. Pérez-Luque^{1,2} , Pablo D. Guerrero-Alonso^{1,2}, Ricardo Moreno-LLorca^{1,2} , Manuel Merino-Ceballos^{1,2}, Andrea Ros-Candeira^{1,2}

(1) Laboratorio de Ecología, Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra (IISTA-CEAMA), Universidad de Granada, Avda. del Mediterráneo s/n, Granada 18006, España.

(2) Grupo de Ecología Terrestre, Departamento de Ecología, Universidad de Granada, Facultad de Ciencias, Campus Fuentenueva s/n, 18071, Granada, España.

* Autor de correspondencia: Regino Zamora [rzamora@ugr.es]

> Recibido el 03 de febrero de 2021 - Aceptado el 12 de marzo de 2021

Cómo citar: Zamora, R., Pérez-Luque, A.J., Guerrero-Alonso, P.D., Moreno-LLorca, R., Merino-Ceballos, M., Ros-Candeira, A. 2021. Uniendo macro y microclima en paisajes de montaña: una aproximación conceptual e instrumental. *Ecosistemas* 30(1): 2166. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2166>

Uniendo macro y microclima en paisajes de montaña: una aproximación conceptual e instrumental

Resumen: Los efectos del cambio climático se manifiestan cada vez con más claridad en todo el planeta. La mala noticia es que los ecosistemas de montaña están entre los más afectados por estos cambios. La buena noticia es que la compleja orografía de las montañas genera un mosaico muy heterogéneo de condiciones ambientales, lo que puede ayudar a conservar la biodiversidad y la provisión de servicios de sus ecosistemas. Caracterizar estos microambientes y vincularlos a las respuestas ecofisiológicas, conductuales y demográficas de los organismos es clave para entender su capacidad de persistencia y su posible adaptación a los nuevos escenarios. En esta contribución presentamos nuestra propuesta conceptual e instrumental para caracterizar los microclimas en ecosistemas de montaña y avanzar en el proceso de integración entre macro y microescalas.

Palabras clave: ecología de montaña; estaciones de monitoreo intensivo; integración entre escalas; macro y microhabitats; redes de sensores; Sierra Nevada

Linking macro- and microclimate in mountain landscapes: a conceptual and instrumental approach

Abstract: The effects of climate change are becoming clearer all over the planet. The bad news is that mountain ecosystems are among the most affected by these changes. The good news is that the complex orography of the mountains generates a very heterogeneous mosaic of environmental conditions, which can help conserve the biodiversity and services provisioning of their ecosystems. Characterizing these microenvironments and linking them to the ecophysiological, behavioral and demographic responses of organisms is key to understanding their persistence capacity and their possible adaptation to new scenarios. In this contribution we present a conceptual and instrumental proposal that we are implementing to characterize microclimates in mountain ecosystems and to advance the integration between macro and micro scales.

Keywords: mountain ecology; cross-scaling; intensive monitoring stations; macro and microhabitats; sensor network; Sierra Nevada

Introducción

Las montañas atesoran una cuarta parte de la biodiversidad terrestre, un tercio de las áreas protegidas mundiales (Körner y Oh-sawa 2005) y gran número de las especies raras y endémicas conocidas (Enquist et al. 2019). Las montañas también proporcionan servicios ecosistémicos vitales para las personas que viven en ellas y en sus entornos (Payne et al. 2017; Mengist et al. 2020). El desafío del presente y el futuro en la conservación del patrimonio natural de las montañas es determinar la exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación de sus ecosistemas al cambio global (Williams et al. 2008; Hansen et al. 2014; Zamora et al. 2017; Røgora et al. 2018).

Es esencial comprender la naturaleza heterogénea de los ecosistemas de montaña como fortaleza para hacer frente al cambio climático. La elevada biodiversidad de los ecosistemas montanos

se explica por la gran variedad de ambientes que albergan como resultado del gradiente altitudinal y de la rugosidad de su superficie. La compleja orografía de las montañas genera un mosaico de condiciones ambientales diferenciado del patrón climático regional, lo que puede tener profundas consecuencias para la persistencia de especies en un escenario de calentamiento global (Dobrowski et al. 2009; Fridley 2009; Scherrer y Korner 2011). De hecho, en los ambientes de montaña se han identificado mosaicos de temperatura muy contrastados a distancias cortas debido fundamentalmente a diferencias topográficas (Fridley 2009; Scherrer y Korner 2010; Korner y Hilfbrenner 2018; Garcia et al. 2020). Incluso la vegetación o la nieve pueden cambiar muy significativamente el ambiente térmico del suelo que cubren (Zellweger et al. 2020). Una especie podría beneficiarse de la existencia de este mosaico de condiciones ambientales ocupando sólo la fracción de microhabitats más adecuados para su tolerancia ecológica (Huey et al. 2012).

Por lo tanto, las montañas permiten la existencia de microambientes favorables para retener biodiversidad en un entorno climático regional cambiante (Dobrowski 2011; Suggitt et al. 2018; García et al. 2020).

Durante las últimas décadas, un buen número de investigaciones han vinculado las características ambientales microclimáticas con las respuestas bióticas, abarcando desde la ecofisiología, el comportamiento y la demografía de los organismos hasta los intercambios de energía y materia (Cheng et al. 1999; Huey et al. 2012; Peñuelas et al. 2013). Adicionalmente, la interfaz entre microclima y ecología ha tenido una aplicabilidad preferente en la gestión y restauración forestal (Aussenac 2000; Gómez-Aparicio et al. 2004). Sin embargo, la gran mayoría de los estudios han analizado los datos climáticos agregados espacial y temporalmente, en vez de explorar los patrones de variabilidad microclimática que caracteriza a un determinado ecosistema (Cheng et al. 1999). En los últimos años se está produciendo un avance sustancial en el campo de investigación emergente "Microclimate Ecology", que integra aspectos físicos y biológicos a diferentes escalas de resolución (Zellweger et al. 2019). Dicha integración es cada vez más necesaria, ya que los factores que controlan los procesos ecológicos pueden interactuar entre escalas, provocando relaciones causa-efecto complejas en los ecosistemas (Soranno et al. 2014). En este sentido, se ha comprobado que el microclima puede tener un papel muy relevante amortiguando los cambios macroclimáticos que puedan ocurrir en un determinado ecosistema (De Frenne et al. 2013). El desarrollo de nuevas herramientas de tecnologías de la información y comunicación (TIC) en el monitoreo ambiental están basadas en la interconexión digital de dispositivos de monitoreo en red (internet de las cosas). Las TIC nos permiten ahora explorar con la mayor resolución espacial y temporal aspectos desconocidos del funcionamiento de los ecosistemas, avanzando en la comprensión de la compleja relación causa-efecto entre variables.

En el Observatorio de Cambio Global de Sierra Nevada (<https://obsnev.es/>) estamos evaluando la exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación de los ecosistemas nevadenses al cambio global (Hansen et al 2014; Zamora et al. 2017). Una de las prioridades de nuestro programa de seguimiento desde sus orígenes ha sido obtener información contrastada sobre las variables climáticas como determinantes de los procesos ecosistémicos (Bonet et al. 2010; Aspízua et al. 2012). Recientemente hemos desarrollado la aplicación Climanevada (<https://climanevada.obsnev.es/>), que nos permite integrar todas las series temporales de datos meteorológicos proporcionados por diferentes proveedores en el entorno de Sierra Nevada (Pérez-Luque et al. 2021b). En esta contribución presentamos la propuesta conceptual e instrumental que estamos implementando para caracterizar los microclimas donde se desenvuelve la ecología de los organismos en los ecosistemas de Sierra Nevada y avanzar en el proceso de integración entre escalas. Los datos microclimáticos se incorporarán al conjunto de series temporales de datos climáticos en Climanevada.

Clima y microclima en los ecosistemas de montaña

Nuestro conocimiento sobre las respuestas bióticas al cambio climático se basa en los datos que proporcionan las estaciones meteorológicas, extrapolando esta información a grandes superficies mediante herramientas de modelización (Lembrechts et al. 2019a, b; Zellweger et al. 2020). Los modelos proyectan la información climática en celdillas espaciales de diferente tamaño (habitualmente igual o superior a 1 km², como la base de datos climáticas WorldClim) (Hijmans et al. 2005; Fick y Hijmans 2017), donde las condiciones ambientales se consideran uniformes para los organismos (Lenoir et al. 2013, 2017). Estas proyecciones macroclimáticas pueden representar adecuadamente las condiciones en grandes superficies llanas y homogéneas, pero el realismo y precisión de las simulaciones disminuye drásticamente al aplicarlas a escalas locales con orografía compleja, donde la topografía puede generar una considerable heterogeneidad ambiental que es ignorada en los mo-

delos (Stewart et al. 2010; Opedal et al. 2015; Lembrechts et al. 2019a, b; Lembrechts y Nijs 2020). Por esta razón, en los ecosistemas de montaña es imprescindible disponer de información meteorológica *in situ* y con la mayor resolución posible, para entender cómo varían realmente los parámetros abióticos (temperatura, precipitación, viento, radiación, deposición de aerosoles) en el mosaico de condiciones ambientales generado por las diferencias en altitud, exposición, pendiente y tipos de cobertura vegetal (Scherrer y Körner 2010; García et al. 2020).

Muchos estudios sobre los efectos del cambio climático en los organismos trabajan con datos de baja resolución espacial (Potter et al. 2013; Maclean 2017; Zellweger et al. 2019). Desde la perspectiva biótica, la realidad es que los organismos viven en microclimas espacio-temporalmente heterogéneos, que pueden diferir mucho del macroclima local (Potter et al. 2013; Zellweger et al. 2019; Lembrechts y Nijs 2020; García et al. 2020). La gran mayoría de los organismos completan su ciclo vital a una escala de resolución espacial muy limitada, bien porque viven fijos a un sustrato (una planta), porque su tamaño es pequeño (pensemos en una hormiga o en los microorganismos del suelo) o porque su ciclo vital es muy complejo, y cada fase del ciclo (larva, adulto) ocupa un ambiente distinto (Körner y Paulsen 2004; Bramer et al. 2018). Esto provoca un gran desajuste entre el espacio vital de los organismos y la escala a la cual los datos climáticos que se usan como predictores de su ecología son tomados y modelados. Por ejemplo, el tamaño de las cuadrículas en los modelos de distribución de especies es, en promedio, ca. 10 000 veces más grandes que los animales que estudian, y ca. 1000 veces más grandes que las plantas que estudian (Potter et al. 2013). Por ello, dos organismos, incluso de la misma especie, que compartan el mismo hábitat pero que tengan tamaños/áreas de campeo muy distintos (por ejemplo, un árbol bien desarrollado y su propágulo, una plántula) percibirán el ambiente climático que comparten de manera muy distinta.

El problema de ajuste entre la escala de percepción del organismo y los valores ambientales de referencia no sólo se evidencian con los valores proyectados por los modelos, sino también con la forma en que se colectan los datos reales en las estaciones meteorológicas. Estos datos, tomados en condiciones muy controladas, ignoran la heterogeneidad microclimática (temperatura, humedad, radiación, velocidad del viento) que se crea cerca de la superficie del suelo, bajo cobertura vegetal o en el dosel de un bosque, que pueden condicionar los procesos ecológicos a escala local (Nakamura et al. 2017; Lembrechts y Nijs 2020; Zellweger et al. 2020). De hecho, el nicho microclimático de la gran mayoría de los organismos no se corresponde con los valores que registran los sensores de una estación meteorológica a 2 m de altura e instalada en un sitio abierto (Lembrechts et al. 2019a, b). Tenemos pues un serio problema de correspondencia entre el dato meteorológico "normalizado" según estándares físicos para permitir su comparación con los datos que proporcionan otras estaciones, y su traslación a la ecología real, que sólo se resuelve si caracterizamos los ambientes microclimáticos donde viven realmente los organismos. Ejemplos de situaciones que pueden producir microambientes son las diferencias de insolación en función de la orientación y la pendiente de la ladera, o las diferencias de temperatura o humedad a nivel de suelo que se producen entre áreas con cobertura vegetal densa, claros desprovistos de vegetación, bajo hojarasca, bajo nieve o debajo de una piedra (Chen et al. 1999; Williams et al. 2008; Opedal et al. 2015).

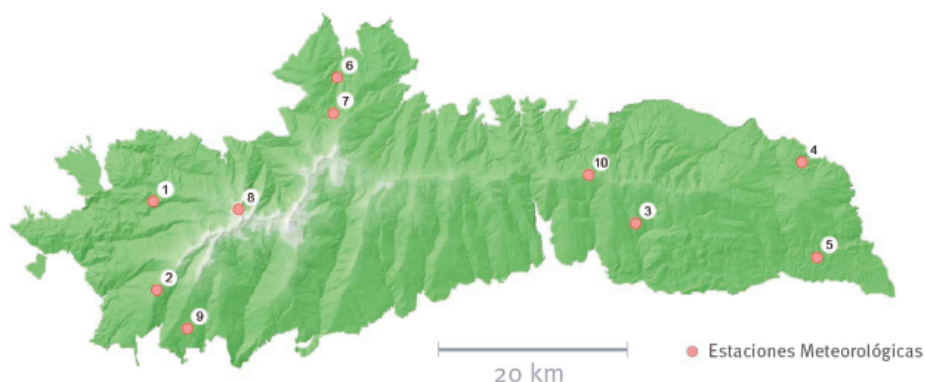
Las Estaciones de Monitoreo Intensivo como puntos de encuentro entre escalas de observación

La práctica totalidad de la información ambiental meteorológica proviene de estaciones situadas a baja altitud y cercanas a los entornos urbanos. Estos emplazamientos pueden ofrecer valores que no son representativos para los ecosistemas de montaña, menos afectados localmente por las actividades humanas y situados a altitudes superiores. Por ello, cuando iniciamos la planificación del programa de seguimiento ambiental asociado al Observatorio de

Cambio Global de Sierra Nevada identificamos como objetivo prioritario la instalación de estaciones meteorológicas multiparamétricas en el interior de Sierra Nevada, para obtener información a pie de campo de sus ecosistemas más representativos, y explorar el amplio gradiente de condiciones ambientales que nos ofrece una alta montaña (Fig. 1). Gracias al apoyo financiero de la Fundación Biodiversidad y del Organismo Autónomo Parques Nacionales, en el año 2008 se instalaron 10 torres multiparamétricas dotadas de sensores meteorológicos, colectores de aerosol (deposición seca) y sensores de radiación total, PAR e infrarroja (Muñoz y Aspizua 2012). La red cumple con los requisitos establecidos por la iniciativa Global Climate Observing System (GCOS).

Concepto de Estación de Monitoreo Intensivo

La monitorización intensiva de zonas en las que se concentra la investigación y los seguimientos en Sierra Nevada es uno de los pilares fundamentales del Observatorio de Cambio Global de Sierra Nevada (Bonet et al. 2010; Aspizua et al. 2012; Zamora et al. 2015). Para vincular la información biótica con la abiótica a diferentes escalas espaciales, en primer lugar, hemos identificado los principales tipos de ecosistemas en Sierra Nevada: bosques naturales (robledales, encinares, pinares), matorrales y pastizales de alta montaña, plantaciones de pinos, matorrales de media montaña y semiáridos, etc. (Pérez-Luque et al. 2019). Estos ecosistemas de referencia



VARIABLES

Variable	Unidad
Precipitación y nivel de nieve	mm y cm
Temperaturas aire y suelo	°C
Humedades relativas aire y suelo	%
Radiaciones: global, UVA, UVB e IR	W/m ²
Radiación PAR	μE/sm ²
Flujo térmico en suelo	W/m ²
Velocidad y dirección de viento	m/s y °
Presión atmosférica	mb



1. Cortijuela
1700 m - Pinar



2. Lanjarón
2400 m - Pastizal montañoso



3. El Encinar
1700 m - Encinar



4. Aljibe de Montenegro
975 m - Retamar



5. Rambla de Guadix
600 m - Matorral



6. Camarate I- Embarcadero
1550 m - Encinar



7. Camarate II- Piedra de los Soldados
2200 m - Matorral



8. Veleta
3100 m - Pastizal montañoso



9. Robledal de Cãñar
1700 m - Robledal



10. Laguna Seca
2300 m - Pastizal montañoso

Figura 1. Localización de las estaciones meteorológicas multiparamétricas en Sierra Nevada situadas en diferentes cotas altitudinales y exposiciones con indicación de las variables que miden. Para cada estación se detalla su nombre, la altitud y el ecosistema al que representa.

Figure 1. Deployment of multiparametric meteorological stations in Sierra Nevada located at different altitude range and exposures, with indication of the variables measured.

han sido el foco de los esfuerzos de muestreo y en ellos se instalaron estaciones multiparamétricas para medir variables abióticas a lo largo de los gradientes altitudinales y de exposición en Sierra Nevada (Fig. 1). Se han implementado diferentes protocolos de muestreo (muestreos de plantas y animales, seguimientos fenológicos, etc.) en el entorno de dichas estaciones para cada ecosistema de referencia (Aspízu et al. 2014).

Hemos desarrollado el concepto de Estaciones de Monitoreo Intensivo (EMI), que son áreas del territorio en torno a una estación meteorológica multiparamétrica, en la que coinciden espacialmente una alta densidad de protocolos de seguimiento ecológico, junto con mediciones abióticas (Zamora et al. 2017). En definitiva, una Estación de Monitoreo Intensivo puede considerarse como un punto caliente (*hotspot*) de obtención de datos bióticos y abióticos en la misma ubicación espacial.

Como ejemplos prácticos de la utilidad que tiene la integración de estas capas de información ecológica tomadas en el mismo sitio podemos señalar los siguientes:

1. Establecer asociaciones espacio-temporales robustas entre variables que están estrechamente relacionadas, por ejemplo: (i) relaciones consumidor / recurso, como la abundancia de frutos carnosos y la abundancia de aves frugívoras en la misma parcela (García et al. 2011), o abundancia de flores y abundancia de polinizadores (Valverde et al. 2014); (ii) mediciones de temperatura y respuestas fenológicas de plantas y animales asociados por parcela (Pérez-Luque et al. 2015); (iii) relación entre la disponibilidad (deposición seca y húmeda) de aerosoles recogidos por los sensores de la estación multiparamétrica y la evaluación in situ de los procesos de eutrofización en sistemas acuáticos y terrestres cercanos (Medina-Sánchez et al. 2015); (iv) colección de imágenes adquiridas en el mismo lugar fijo para monitorear los cambios fenológicos en el estado de la vegetación y los cambios ambientales durante largos períodos.
2. Validación de campo para sensores remotos. La gran concentración de información biofísica recopilada en la misma parcela de un ecosistema de referencia hace que sea el sitio ideal para la validación de campo necesaria para interpretar la información espectral adquirida por teledetección (Palade y Serrano 2014).
3. Comparar los datos de los sensores de una estación meteorológica con sensores colocados en diferentes microhábitats. Cuanto más se desacopla un microhábitat concreto de las condiciones atmosféricas generales por la topografía y estructura de la vegetación, mayor será la desviación de los valores ambientales del microhábitat con respecto a las condiciones "promedio" que miden los sensores de la estación meteorológica y que son representativos del hábitat general (Scherrer y Körner 2010).

Conexión con la escala de percepción de los organismos: Monitorización intensiva de microhábitats

Los sensores de una estación multiparamétrica como las que hemos descrito anteriormente bajo el concepto de Estaciones de Monitoreo Intensivo proporcionan unas medidas que pueden no corresponderse con las medidas de las mismas variables en los microhábitats donde se desarrolla la biología de los organismos. En este sentido, disponer de la información que nos proporcionan los sensores de las estaciones meteorológicas multiparamétricas es una condición necesaria para caracterizar con rigor el macroclima real del hábitat local, pero no suficiente desde la escala de percepción ecológica de los organismos. Podríamos plantearnos la siguiente pregunta: ¿de qué manera el valor de temperatura que está midiendo el sensor de una estación meteorológica situado a dos metros de altura (por ejemplo 10 grados), se corresponde con el ambiente térmico al que realmente se enfrentan los organismos que viven en la proximidad de la estación, pero en la superficie del suelo, bajo una piedra, bajo hojarasca, bajo la copa de un árbol o de un matorral, o enterrados en el suelo? Lo mismo podríamos plantearnos del resto de parámetros abióticos (viento, humedad,

radiación, etc). Una cuestión muy relevante en el contexto de cambio climático es cuantificar la humedad del suelo en diferentes microhábitats, asociando dicha humedad a la precipitación recogida en la torre multiparamétrica. Por ejemplo: una lluvia de 30 mm que cae en un día concreto, ¿en qué cuantía incrementa la humedad del suelo en microhábitats diferentes del mismo hábitat general y misma cota altitudinal?; ¿cuánto dura la reserva de humedad en el suelo tras la estación de lluvias en microhábitats distintos situados en la misma cota altitudinal y mismo hábitat general? Y ¿cómo varía dicha reserva entre años climatológicamente contrastados? En este sentido, es clave determinar la evolución de la reserva de agua en el suelo (en diferentes altitudes, en diferentes exposiciones, en diferentes hábitats y microhábitats de cada altitud) durante la estación seca, para poder identificar las ventanas temporales durante las cuales no va a haber humedad en el suelo suficiente para la captación de agua por las raíces de las plantas y la actividad biológica de microorganismos.

Características de la red de sensores desplegada en Sierra Nevada

Utilizando como ecosistema diana los robledales (*Quercus pirenaica*) de Sierra Nevada, que representa el bosque natural dominante, hemos diseñado y desplegado una red de sensores con el objetivo de monitorizar a escala microclimática la variación de la temperatura y la humedad en 3 localidades representativas de los robledales existentes (Pérez-Luque et al. 2021a): Robledal de la Dehesa del Camarate (norte); Robledal del Genil (oeste) y Robledal de Cáñar-Soportújar (sur). Con este diseño hemos querido comparar las condiciones ecológicas de un mismo tipo de ecosistema (robledal) en exposiciones contrastadas de Sierra Nevada. De esta forma obtenemos información muy detallada sobre temperatura y humedad de suelo y aire en los diferentes hábitats y microhábitats de los robledales de Sierra Nevada a lo largo de un amplio gradiente altitudinal. Dicha información nos sirve también para interpretar cómo se traducen las medidas de temperatura y precipitación que proporcionan las estaciones meteorológicas, a una escala de resolución espacial más fina.

La red de sensores está compuesta por un conjunto de microestaciones multiparamétricas autónomas que integran sensores digitales de última generación y que permiten el envío de la información monitorizada, así como del estado de cada estación, en tiempo real empleando frecuencias GPRS y NB-IoT. El empleo de estas frecuencias (operadas por operadores de telecomunicaciones a nivel nacional/internacional) nos evita el tener que desplegar una red propia.

Estos equipos funcionan de forma indefinida (alimentación dual mediante panel solar y batería) y autónoma. Además, dadas sus características, cualquier fallo o degradación de sus funcionalidades se detecta en tiempo real, facilitando su rápida reparación.

El intervalo de medición es cada 30 minutos, y el envío de información se produce cada 6 horas (optimizando así el uso de las baterías). Las especificaciones técnicas de los equipos y sensores, así como su disposición se muestran en la Figura 2.

El conjunto de alimentadores, registrador de datos y sensores que forman la microestación están sujetos a un soporte diseñado y desarrollado por nuestro equipo para esta red. Se trata de un soporte de aluminio ajustable que va anclado al suelo y que se complementa con la colocación de vientos en las cotas más elevadas. En cada microestación, medimos humedad y temperatura en cuatro microhábitats:

- Bajo Suelo: 40 cm bajo el suelo
- En la superficie del suelo: sobre suelo desnudo
- En la superficie del suelo, pero protegida por: a) Bajo piedra en *Claro de bosque*, o b) bajo hojarasca en *Robledal* o *Matorral* de alta montaña
- Aire: 80-100 cm sobre el suelo

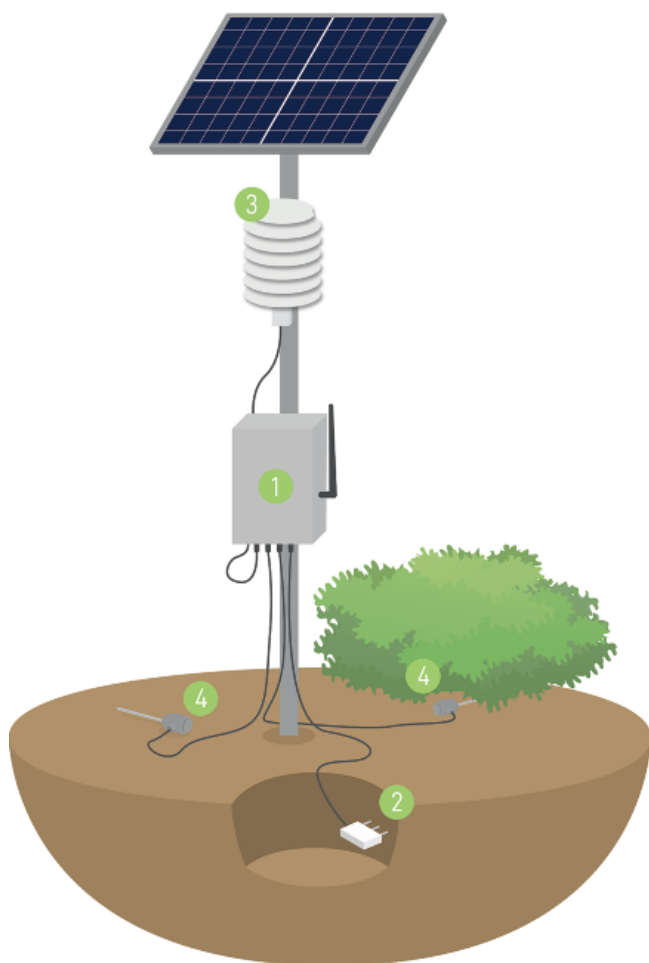


Figura 2. Esquema de una microestación multiparamétrica.

Figure 2. Devices of a multiparametric microstation.

Estas características corresponden a las de la red instalada en campo en la actualidad (**Fig. 3**) y que sustituye a otra red instalada anteriormente cuyo sistema de comunicación ha quedado obsoleto. Las características de la red instalada inicialmente fueron:

- Comunicación de equipos usando frecuencias WiFi a nivel interno, para lo cual se desplegó una red WiFi que diese cobertura los equipos.
- Descarga de datos en remoto vía GPRS.
- Sensor de temperatura/humedad bajo suelo METER Group ECH2O 10HS.
- Resto de sensores (temperatura y humedad en aire, temperatura superficie y temperatura en superficie cubierta) modelo SHT10.

Todos ellos con rangos de medición compatibles con los sensores utilizados en la red actualmente.

Diseño espacial de la red

Red de sensores desplegada a lo largo de un amplio gradiente altitudinal

El objetivo es cuantificar la variación altitudinal de las variables abióticas en los mismos microhábitats a lo largo de un amplio gra-

1 Datalogger

- E/S Analógicas y Digitales, puertos RS-232 y SDI-12.
- Conectividad GSM/GPRS y NB-IoT.
- Alimentación dual mediante batería y panel solar.
- Protección IP67.

2 Sonda Teros 11

- VWC con resolución 0.001 m³/m³ y rango variable en función de la calibración.
- Temperatura de suelo, rango entre -40 y 60 °C, con resolución de 0,1 °C.

3 Sonda SexTH RTH300D

- Humedad ambiental (rango entre 0 y 100%, y resolución 0,1%).
- Temperatura (rango de -25 a 65 °C y resolución 0,1 °C).

4 Sonda Teros 11

- Temperatura en superficie (rango de -25 a 85 °C y resolución 0,1 °C).
- Una colocada en la superficie del suelo y otra al mismo nivel pero cubierta con distintos elementos en función del microhábitat de instalación.

diente altitudinal (1300-2300 m.s.n.m.). Muestreamos 3 robledales en exposiciones contrastadas (N,W,S), y desplegamos los sensores a lo largo de un amplio gradiente altitudinal (que abarca desde la cota altitudinal más baja donde empieza el robledal hasta por encima del límite superior del bosque). El despliegue de sensores se hace en 4 cotas altitudinales, 2 hábitats por cota (Bosque/claro) y 3 réplicas de cada hábitat (**Fig. 4**).

En cada cota altitudinal, se han desplegado 6 microestaciones, según el siguiente diseño:

- 3 microestaciones en Robledal o Matorral de alta montaña.
- 3 microestaciones en Claros de bosque, se trata de espacios abiertos en el bosque o matorral de alta montaña.

Esto supone que, en cada cota, tenemos 6 puntos de medida. Al muestrear en 4 cotas altitudinales, tenemos un total de 24 puntos de medida en cada gradiente altitudinal.

Red de sensores instalada en el entorno de las estaciones meteorológicas

El objetivo es traducir las medidas de las variables abióticas que toman los sensores de la estación a las medidas reales que dichas variables tienen en los diferentes microhábitats próximos a la estación (**Fig. 5**).



Figura 3. Ejemplos de hábitats tipo monitorizados con microestaciones multiparamétricas (a. matorral de alta montaña; b. robleal; c. claro de bosque).

Figure 3. Examples of habitats monitored with multiparametric microstations (a. high mountain scrub; b. oak forest; c. forest clearing).

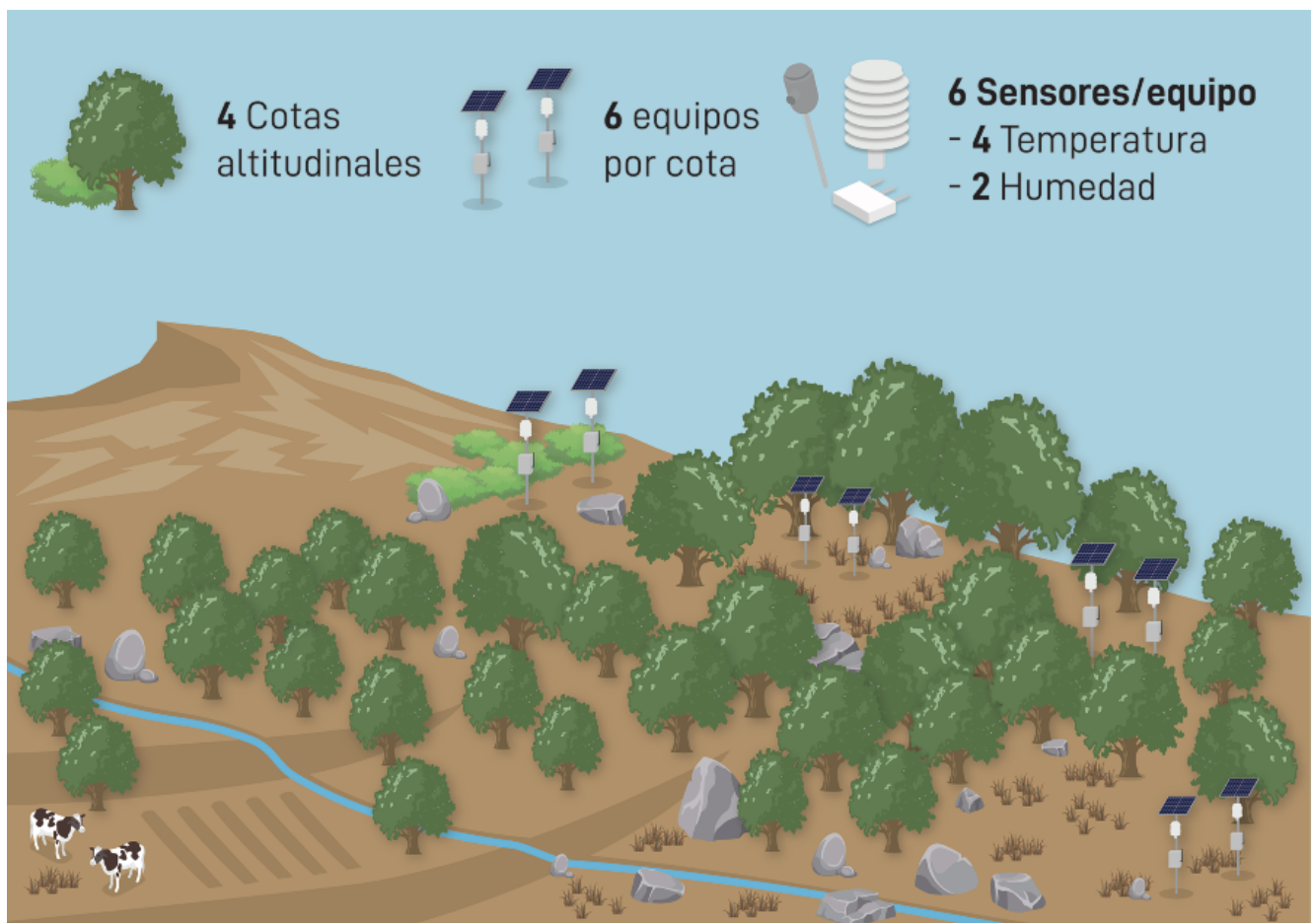


Figura 4. Despliegue de la red de sensores a lo largo de un gradiente altitudinal desde 1600 hasta 2000 m.s.n.m. Las 6 microestaciones por cota altitudinal se distribuyen en 3 microestaciones en robleal o matorral de alta montaña, y 3 en claros del bosque o matorral.

Figure 4. Deployment of the sensor network along an altitudinal gradient. The 6 microstations located at each altitudinal range are distributed as follow: 3 microstations in oak or high mountain scrub, and 3 in forest/ high mountain scrub clearing.

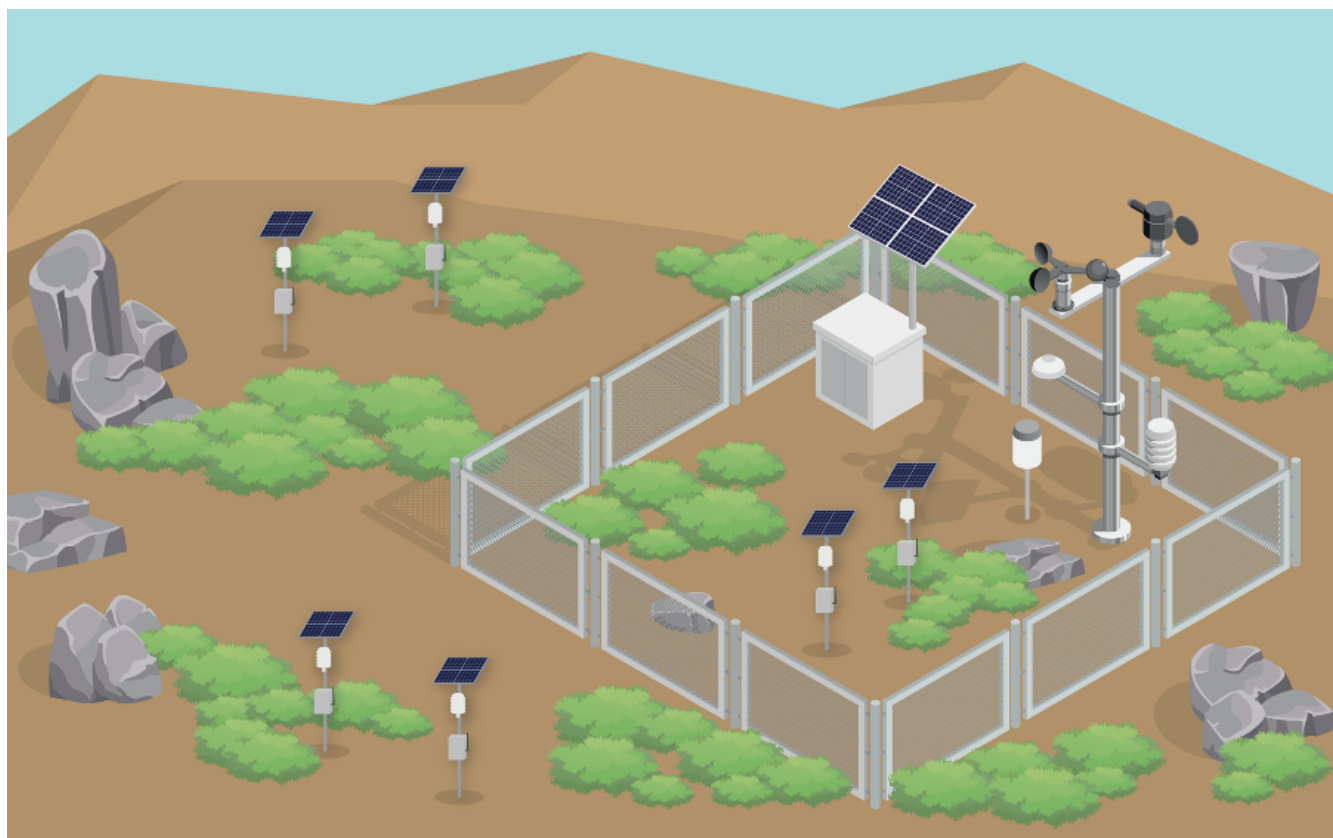


Figura 5. Despliegue de la red de microestaciones en la inmediata proximidad de la estación meteorológica.

Figure 5. Deployment of the network of microstations in the immediate vicinity of the meteorological station.

Ejemplos de “cross-scaling” entre los datos tomados por las estaciones macro y microclimáticas

Hemos utilizado información procedente de un estudio piloto anterior (años 2018-2020) en el que pusimos a prueba nuestro concepto de red de sensores para explorar microclimas en el robleal de Cáñar (Sánchez-Cano et al. 2017), en la vertiente Sur de Sierra Nevada. La zona donde se colocaron los sensores corresponde con un robleal con estructura abierta, con pequeños bosquetes de robles con una densidad de 410 árboles/ha caracterizado por presentar una altura media de 9.1 m (Pérez-Luque et al. 2021a), intercalados con claros con vegetación herbácea y arbustiva de porte bajo. En este robleal existe una estación meteorológica en la que se miden diferentes variables. En el entorno de esta estación, se instalaron varias microestaciones en zonas abiertas y en zonas de bosque. Cada una de las microestaciones ha tomado medidas de temperatura y de humedad siguiendo el siguiente esquema:

- Temperatura y humedad relativa del aire a 45 cm
- Temperatura de la superficie
- Temperatura del suelo (bajo piedra en zonas abiertas; y bajo la hojarasca en zonas de bosque)
- Temperatura del suelo y contenido volumétrico de agua a 30 cm de profundidad

A continuación, se muestran los resultados de este muestreo microclimático piloto agrupándolos en tres casos de estudio concretos.

Caso de estudio 1. ¿Qué rango de variación temporal tienen las temperaturas medias, máximas y mínimas en los diferentes microhábitats de una cota de altitud determinada en comparación con los datos registrados por la estación meteorológica?

Para analizar los rangos de variación de las temperaturas en los diferentes microhábitats hemos seleccionado los datos de invierno y de verano, y hemos comparado los promedios de las tem-

peraturas medias, mínimas y máximas que se registran en la estación meteorológica y en cada microhábitat de los hábitats claro de bosque (open; claros de bosque; n=3) vs. robleal (forest; n=3) de su entorno inmediato (Fig. 6). En invierno no se obtienen diferencias significativas entre los datos registrados por la estación y los registrados por los sensores en los diferentes microhábitats. Asimismo, la comparación entre los dos microhábitats para el resto de variables no muestra diferencias significativas, excepto para los datos de temperatura del suelo a 30 cm de profundidad, que son superiores en los sensores situados en bosque. Sin embargo, en verano encontramos diferencias significativas para todas las variables. Así, por ejemplo, observamos que la temperatura bajo piedra (open) / hojarasca (forest), en superficie y a 30 cm de profundidad es siempre inferior en el bosque, poniendo de manifiesto la importancia del dosel arbóreo en la amortiguación de los valores de temperatura en el periodo más crítico para la vegetación mediterránea.

Caso de estudio 2. ¿Qué temperaturas se registran en un día muy caluroso de verano en los diferentes microhábitats del robleal?

Hemos seleccionado el día más caluroso ocurrido entre los años 2018 y 2019, y hemos analizado las diferencias entre la temperatura registrada por la estación meteorológica y la registrada en las zonas abiertas y de bosque. Las mayores oscilaciones térmicas se observan siempre en los microhábitats situados en los claros del bosque. (Fig. 7).

Caso de estudio 3. Evolución del contenido volumétrico de agua en el suelo en diferentes microhábitats

Los robleales de *Quercus pyrenaica* se distribuyen en Sierra Nevada de forma discontinua, estando siempre asociados a los enclaves más umbríos y húmedos (Pérez-Luque et al. 2020). El aporte extra de humedad que necesitan para soportar la sequía estival proviene de dos vías: de los ríos y acequias de careo o del aire

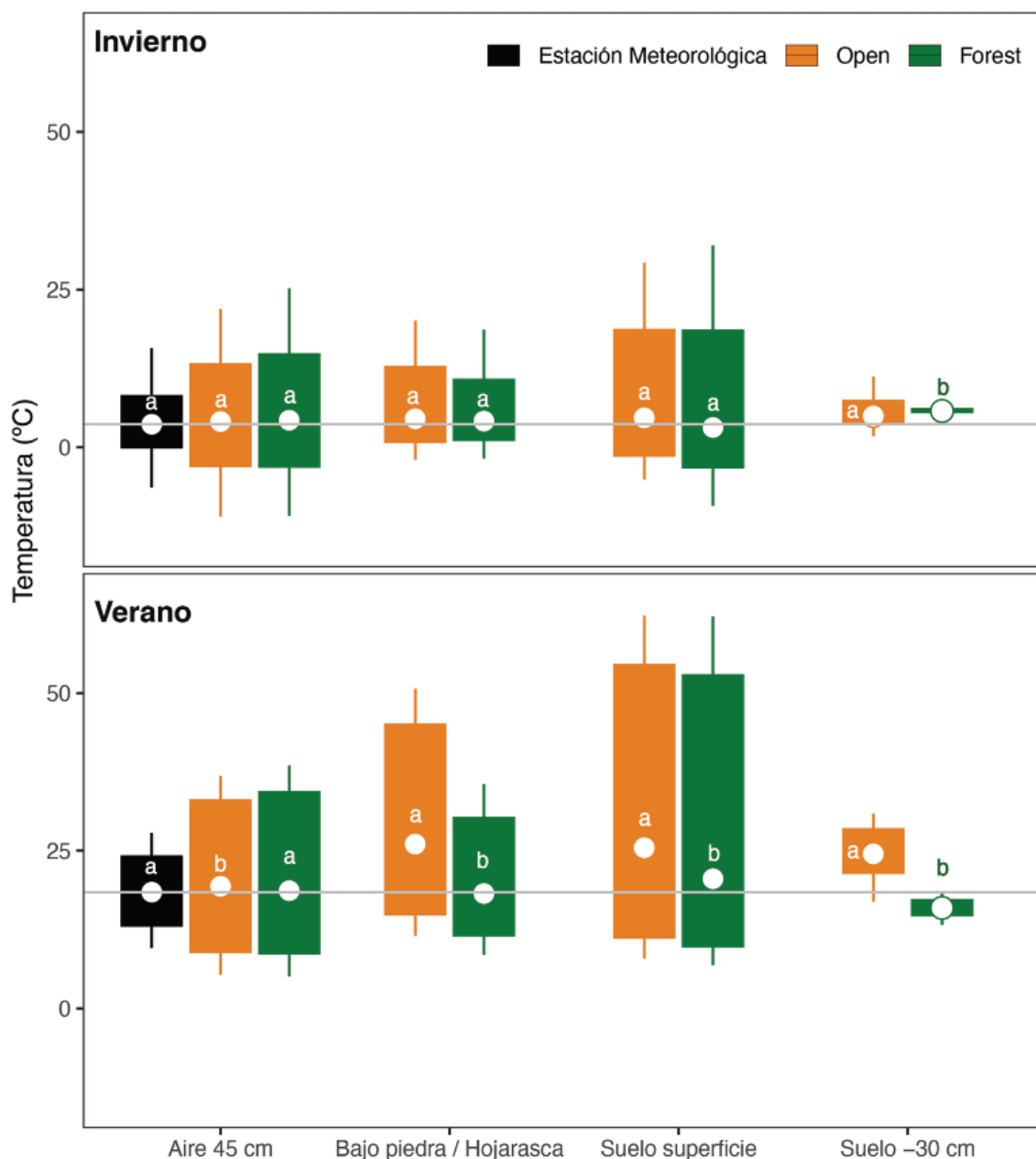


Figura 6. Rango de variación de las temperaturas en invierno y verano registradas en la estación meteorológica (negro) y por las microestaciones en claros de bosque (marrón, "open") y zonas de bosque (verde, "forest"). Las cajas muestran los promedios de las temperaturas mínimas y máximas diarias. El punto central muestra el promedio de las temperaturas medias diarias. La línea horizontal gris muestra el valor medio de la temperatura del aire en la estación meteorológica. Los "bigotes" indican los valores máximos y mínimos registrados de temperatura. Diferentes letras indican valores significativamente diferentes (pruebas no paramétricas: Kruskal Wallis y test de Wilcoxon para el caso de la temperatura del aire; y test de Wilcoxon para el resto de variables).

Figure 6. Range of variation of temperatures in winter and summer recorded in the meteorological station (black) and by microstations in forest clearings (brown, "open") and forest areas (green, "forest"). The boxes show the average daily minimum and maximum temperatures. The center point shows the average daily mean temperatures. The horizontal grey line shows the mean value of the air temperature at the weather station. The "whiskers" indicate the maximum and minimum recorded temperature values. Different letters indicate significantly different values (non-parametric tests: Kruskal Wallis and Wilcoxon test for the case of air temperature; and Wilcoxon test for the rest of the variables).

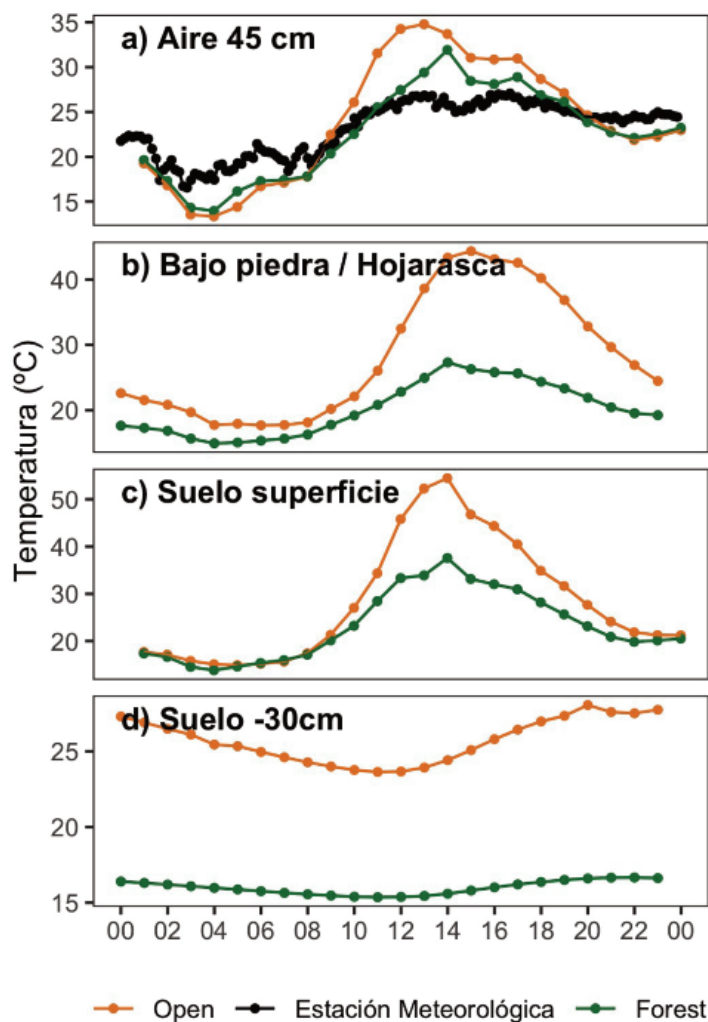


Figura 7. Variación horaria de la temperatura del día 19-Julio-2018 (día más caluroso del periodo 2018-2019 en el robledal de Cãñar). a) Variación de la temperatura del aire registrada en la estación meteorológica de Cãñar (línea negra) y a 45 cm en las zonas de bosque (línea verde) y en los claros de bosque (línea marrón). Variación a lo largo del día de la temperatura del suelo cubierto (bajo piedra; o bajo hojarasca) (b); de la temperatura de la superficie del suelo (c); y de la temperatura del suelo a 30 cm de profundidad (d). Para cada variable se compara los valores registrados en los diferentes hábitats: claros de bosque (open) y zonas de bosque (forest).

Figure 7. Hourly variation of the temperature on July 19, 2018 (hottest day of the 2018-2019 period in the Cãñar oak grove). a) Variation in air temperature recorded at the Cãñar meteorological station (black line) and at 45 cm in forest areas (green line) and in forest clearings (brown line). Variation throughout the day of the temperature of the covered soil (under stone; or under litter) (b); of the temperature of the soil surface (c); and soil temperature at 30 cm depth (d). For each variable, the values recorded in the different habitats are compared: forest clearings (open) and forest areas (forest).

húmedo proveniente del Mediterráneo (Martínez-Parras y Molero-Mesa 1982), en el caso de los robledales de la vertiente sur de Sierra Nevada. Las diferencias en la disponibilidad de agua afectan al crecimiento (Gea-Izquierdo y Cañellas 2014; Pérez-Luque et al. 2020), supervivencia (Gómez-Aparicio et al. 2008) y regeneración de la especie (Mendoza et al. 2009).

En este caso de estudio mostramos la variación de la precipitación durante tres años (2018-2020) en el robledal de Cãñar (Fig. 8). Observamos cómo varía la precipitación a lo largo del año y cómo se traduce esa medida en cada uno de los microhábitats analizados (Claros de bosque y Bosque).

El contenido volumétrico en agua en el suelo de las zonas de bosque es superior al de las zonas de claros (Fig. 9), siendo estas diferencias más notables desde final de primavera hasta mediados de verano. Estos datos ponen de manifiesto que, para la misma cantidad de precipitación recibida, el suelo del robledal retiene humedad durante un periodo de tiempo mayor (prácticamente un mes adicional (Fig. 9), que el suelo de los claros del bosque, que se seca mucho antes cuando llega el verano. Estos resultados sugieren que el dosel arbóreo reduce la evapotranspiración del suelo durante el verano y que los robles captan el agua a mayor profundidad. Esta mayor duración de la reserva de agua en el suelo debe de contribuir

significativamente a amortiguar el efecto de la sequía estival en los robledales nevadenses.

Consideraciones finales de nuestro despliegue de sensores

Nuestra aproximación conceptual nos permite una vinculación robusta entre variables macro y microclimáticas tomadas en la misma localidad. El despliegue y la instalación de los sensores se basa en preguntas científicas que pretenden diagnosticar la exposición, vulnerabilidad y capacidad de adaptación de los robledales de montaña frente al cambio climático, considerando el mosaico de condiciones ecológicas existente. La miniaturización en sensores y fuentes de alimentación, junto al desarrollo de nuevas tecnologías de la comunicación, como el Internet de las cosas (IoT) nos permiten ahora explorar los microambientes del mundo real, en tiempo real, donde viven los organismos. La instalación y puesta en funcionamiento de cada microestación en el campo se puede realizar en aproximadamente 1 h. En una mañana de trabajo de campo y llevando todo el material preparado, 4 personas pueden dejar instaladas 6 microestaciones (https://obsnev.es/docs/ecosistemas/Apendice_I.pdf).

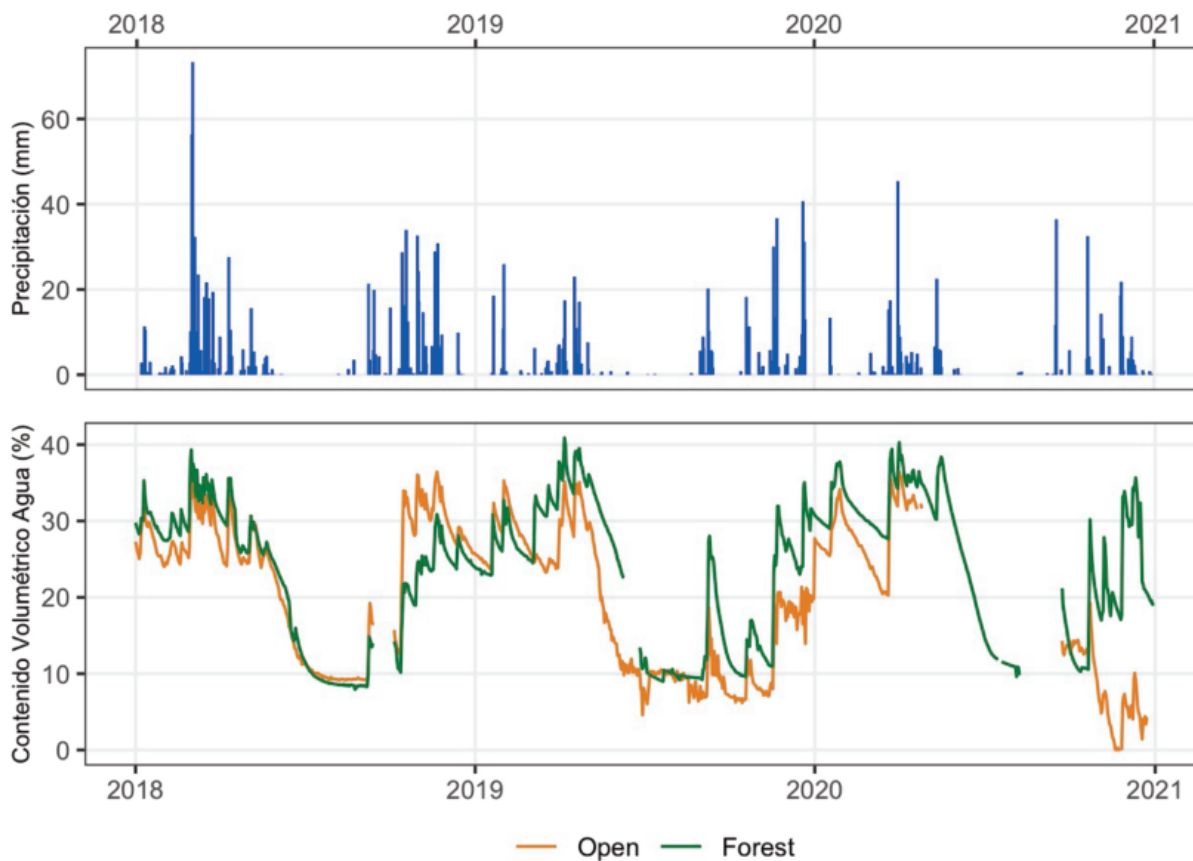


Figura 8. Evolución temporal de la precipitación (líneas azules) durante los años 2018-2020 en la estación meteorológica (panel superior) situada en el Robledal de Cádiz; evolución del contenido volumétrico en agua del suelo a -30 cm de profundidad en los dos microhábitats (panel inferior): claros de bosque (línea marrón) y zonas de bosque (línea verde).

Figure 8. Temporal evolution of precipitation (upper panel, blue lines) during the years 2018-2020 at the meteorological station located in Robledal de Cádiz; evolution of the volumetric water content of the soil at -30 cm depth in the two habitats (bottom panel): forest clearings (brown line) and forest areas (green line).

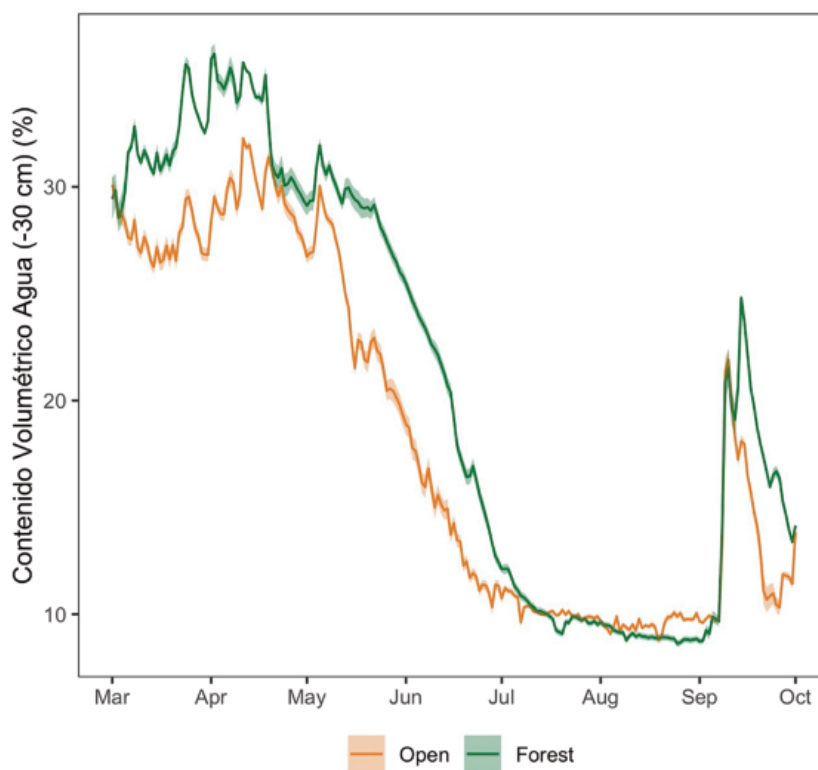


Figura 9. Comparación de la evolución temporal (marzo-septiembre) del contenido volumétrico en agua (%) en zonas de claro (línea marrón) y zonas de bosque (línea verde). Se muestran los datos promedios de 3 años. Los intervalos indican error estándar.

Figure 9. Comparison of the temporal evolution (March-September) of the volumetric water content (%) in forest clearing areas (brown line) and forest areas (green line). The 3-year average data is shown. Intervals indicate standard error.

La mayoría de los despliegues de sensores realizados hasta la fecha maximizan la cobertura espacial, muestreando muchos puntos en poco tiempo, bien con sensores de pequeño tamaño (por ejemplo, HOBO, iButtons), que presentan una dependencia energética, o con sensores aerotransportados por drones (e.g. Fridley 2009; García et al. 2020). Sin embargo, al igual que una estación meteorológica, nuestra microestación es autónoma al tener su propia fuente de alimentación mediante panel solar. Además, el registrador de datos se puede configurar para conectarle diferentes tipos de sensores y enviar los datos en tiempo real durante un período indefinido de tiempo. Por otra parte, al igual que los iButtons, nuestra microestación puede medir directamente en los microhábitats donde se desenvuelve la ecología de los organismos, y podemos colocar un número adecuado de réplicas por hábitat y microhábitat. Una ventaja adicional de nuestra microestación es que también envía en tiempo real información del estado de las baterías y del nivel de señal, lo que nos permite garantizar la continuidad del envío de datos, o en su caso, detectar los fallos de cobertura o batería y las posibles averías de los sensores.

Nuestra red de sensores nos permite explorar la heterogeneidad espacial y temporal, pudiendo distribuir los sensores en un gradiente amplio de condiciones ambientales. Las características técnicas y durabilidad de la instalación facilitarán la obtención de series temporales de datos microclimáticos de duración indefinida en los mismos puntos de muestreo, explorando localmente gradientes macro y microclimáticos en contextos paisajísticos heterogéneos. En definitiva, nuestra aproximación conceptual e instrumental nos permite evaluar el grado de desacoplamiento entre las medidas tomadas a escala macro y micro en un contexto espacial y temporal determinado (Fridley 2009; Dobrowski et al. 2009; Zellweger et al. 2019). Nos permite también explorar con rigor las relaciones causa-efecto entre el ambiente abiótico en el que se desenvuelven la biología de los organismos y sus respuestas ecofisiológicas, así como las posibles interacciones entre las diferentes escalas espaciales y temporales (De Frenne et al. 2013; Soranno et al. 2014). El siguiente reto que vamos a asumir es ligar estas medidas microclimáticas con variables respuesta representativas del estado ecofisiológico, conductual y demográfico de los organismos. Por ejemplo, en el caso de plantas leñosas, instalando sensores que midan en continuo variables descriptoras del estado ecofisiológico (eg. flujo de savia, crecimiento o fenología) o a intervalos de tiempo (eg. actividad fotosintética), para poder establecer relaciones causa-efecto robustas entre las medidas macro y microclimáticas y las respuestas ecofisiológicas asociadas en el mismo microhábitat. De esta manera tenderemos puentes en la compleja cadena de causalidad Macroclima>Microclima>Respuesta biótica en un contexto espacial y temporal explícito.

Agradecimientos

Este trabajo se está desarrollando en el marco del Convenio de colaboración entre la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía y la Universidad de Granada para la realización de actividades vinculadas al Observatorio de Cambio Global de Sierra Nevada. La infraestructura ha sido adquirida por la Universidad de Granada gracias a un proyecto de infraestructuras del Ministerio de Ciencia e Innovación concedido al IISTA-UGR titulado: Equipamiento para la participación del IISTA en redes y proyectos científicos internacionales. Referencia: EQC2019- 006423-P. Agradecemos también el apoyo parcial recibido de los proyectos LIFE-ADAPTAMED (LIFE14 CCA/ES/000612): Protección de servicios ecosistémicos clave amenazados por el cambio climático mediante gestión adaptativa de socioecosistemas mediterráneos y del proyecto H2020 European Long-Term Ecosystem and socio-ecological Research Infrastructure (eLTER). A Aranzazu Manjon Goya, del Organismo Autónomo de Parques Nacionales, por facilitarnos la información de las estaciones multiparamétricas instaladas en Sierra Nevada y a dos revisores anónimos por las sugerencias aportadas. Agradecemos a la dirección y equipo técnico del Espacio Natural de Sierra Nevada su apoyo decidido a nuestro trabajo en Sierra Nevada y su colaboración conti-

nuada en el marco de las actividades conjuntas que desarrollamos en el Observatorio de Cambio Global. Agradecemos muy especialmente a los Agentes de Medio Ambiente del Espacio Natural Sierra Nevada su ayuda en la instalación y vigilancia de la red de sensores. Este artículo está dedicado a ellos.

Contribución de los autores

Regino Zamora: Dirección y coordinación científica, Escritura, edición y revisión del manuscrito. Antonio J. Pérez-Luque: Análisis de los datos, escritura y revisión de texto. Manuel Merino-Ceballos: Software, Visualización, Validación, Redacción – revisión. Pablo David Guerrero-Alonso: Hardware y Software, Visualización, Validación, Redacción – revisión. Ricardo Moreno-Llorca: Validación, Redacción – revisión. Andrea Ros-Candeira: Redacción – revisión.

Referencias

- Aspízu, 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, Sevilla, España.
- Aspízu, R., Barea-Azcón, J.M., Bonet, F.J., Pérez-Luque, A.J. and Zamora, R.J. (coords.). 2014. *Sierra Nevada Global-Change Observatory. Monitoring methodologies*. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, Sevilla, España. 112 pp.
- Aussenac, G. 2000. Interactions between forest stands and microclimate: Ecophysiological aspects and consequences for silviculture. *Annals of Forest Science* 57: 287–301.
- Bonet, F.J., Pérez-Luque, A.J., Moreno-Llorca, R., Zamora, R. 2010. *Observatorio de Cambio Global en Sierra Nevada. Estructura y Contenidos Básicos*. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía - Universidad de Granada, Granada, España.
- Bramer, I., Anderson, B., Bennie, J., Bladon, A., De Frenne, P., Hemming, D., et al. 2018. Advances in monitoring and modelling climate at ecologically relevant scales. *Advances in Ecological Research* 58:101–161.
- Chen, J. et al. 1999. Microclimate in forest ecosystem and landscape ecology: Variations in local climate can be used to monitor and compare the effects of different management regimes. *Bioscience* 49: 288–297.
- Dobrowski, S.Z. 2011. A climatic basis for microrefugia: The influence of terrain on climate. *Global Change Biology* 17: 1022–1035.
- Dobrowski, S.Z., Abatzoglou, J.T., Greenberg, J.A., Schladow, S.G. 2009. How much influence does landscape-scale physiography have on air temperature in a mountain environment? *Agricultural and Forest Meteorology* 149: 1751–1758.
- De Frenne, P., Rodríguez-Sánchez, F., Coomes, D., Baeten, L., Verstraeten, G., Vellend, M., et al. 2013. Microclimate moderates plant responses to macroclimate warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 110: 18561–18565.
- Enquist, B.J., Feng, X., Boyle, B., Maitner, B., Newman, E.A., Jørgensen, P.M., et al. 2019. The commonness of rarity: Global and future distribution of rarity across land plants. *Science Advances* 5.
- Fick, S.E., Hijmans, R.J. 2017. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37(12): 4302–4315.
- Fridley, J.D. 2009. Downscaling climate over complex terrain: high finescale (<1000m) spatial variation of near-ground temperatures in a mountain forested landscape (Great Smoky Mountains). *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 48:1033–1049.
- García, D., Zamora, R., Amico, G.C. 2011. The spatial scale of plant–animal interactions: effects of resource availability and habitat structure. *Ecological Monographs* 81: 103–121.
- García, M.B., Domingo, D., Pizarro, M., Font, X., Gómez, D., Ehrlén, J. 2020. Rocky habitats as microclimatic refuges for biodiversity. A close-up thermal approach. *Environmental and Experimental Botany* 170: 103886.
- Gea-Izquierdo, G., Cañellas, I. 2014. Local climate forces instability in long-term productivity of a Mediterranean oak along climatic gradients. *Ecosystems* 17: 228–241.
- Gómez-Aparicio, L., R. Zamora, J. M. Gómez, J. A. Hódar, J. Castro, E. Baraza. 2004. Applying plant positive interactions to reforestation in Mediterranean mountains: a meta-analysis of the use of nurse plants. *Ecological Applications* 14: 1128– 1138.

- Gómez-Aparicio, L., Pérez-Ramos, I.M., Mendoza, I., Matías, L., Quero, J.L., Castro, J., et al. 2008. Oak seedling survival and growth along resource gradients in Mediterranean forests: implications for regeneration in current and future environmental scenarios. *Oikos* 117: 1683–1699.
- Hansen, A.J., Piekielek, N., Davis, C., Haas, J., Theobald, D.M., Gross, J.E., et al. 2014. Exposure of U.S. National Parks to land use and climate change 1900–2100. *Ecological Applications* 24: 484–502.
- Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G., Jarvis, A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25: 1965–1978.
- Huey, R.B., Kearney, M., Krockenberger, A., Holtum, J., Jess, M., Williams, S. 2012. Predicting organismal vulnerability to climate warming: roles of behaviour, physiology and adaptation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 367: 1665–1679.
- Körner, C., Hiltbrunner, E. 2018. The 90 ways to describe plant temperature. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 30: 16–21.
- Körner, C., Ohsawa, M. 2005. Mountain systems. En: Hassan, R., Scholes, R., Ash, N. (eds.). *Ecosystems and human well-being: current state and trends*, pp. 681–716. Island Press. Washington, DC, Estados Unidos.
- Körner, C., Paulsen, J. 2004. A world-wide study of high altitude treeline temperatures: Study of high altitude treeline temperatures. *Journal of Biogeography* 31: 713–732.
- Lembrechts, J.J., Nijs, I. 2020. Microclimate shifts in a dynamic world. *Science* 368: 711–712.
- Lembrechts, J.J., Lenoir, J., Roth, N., Hattab, T., Milbau, A., Haider, S., et al. 2019a. Comparing temperature data sources for use in species distribution models: From in-situ logging to remote sensing. *Global Ecology and Biogeography* 28: 1578–1596.
- Lembrechts, J., Nijs, I., Lenoir, J. 2019b. Incorporating microclimate into species distribution models. *Ecography* 42: 1267–1279.
- Lenoir, J., Graae, B.J., Aarrestad, P.A., Alsos, I.G., Armbruster, W.S., Austrheim, G., et al. 2013. Local temperatures inferred from plant communities suggest strong spatial buffering of climate warming across Northern Europe. *Global Change Biology* 19: 1470–1481.
- Lenoir, J., Hattab, T., Guillaume, P.J. 2017. Climatic microrefugia under anthropogenic climate change: implications for species redistribution. *Ecography* 40: 253–266.
- Macleán, I.M.D., Suggitt, A. J., Wilson, R.J., Duffy, J.P., Bennie, J.J. 2017. Fine-scale climate change: modelling fine-scale spatial variation in biologically meaningful rates of warming. *Global Change Biology* 23: 256–268.
- Martínez-Parras, J.M., Molero-Mesa, J. 1982. Ecología y fitosociología de *Quercus pyrenaica* Willd. en la provincia Bética. Los melojares béticos y sus etapas de sustitución. *Lazaroa* 4: 91–104.
- Medina-Sánchez, J.M., Delgado-Molina, J.A., Carrillo, P. 2015. Centinelas del cambio global (I): las algas mixotróficas en la Laguna de La Caldera. En: Zamora, R., Pérez-Luque, A.J., Bonet, F.J., Barea-Azcón, J.M., Aspizua, R. (eds.). *La huella del cambio global en Sierra Nevada: Retos para la conservación*, pp.: 81–83. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Junta de Andalucía. Sevilla, España.
- Mendoza, I., Zamora, R., Castro, J. 2009. A seeding experiment for testing tree-community recruitment under variable environments: Implications for forest regeneration and conservation in Mediterranean habitats. *Biological Conservation* 142: 1491–1499.
- Mengist, W., Soromessa, T., Legese, G. 2020. Ecosystem services research in mountainous regions: A systematic literature review on current knowledge and research gaps. *Science of The Total Environment* 702: 134581.
- Muñoz, J.M., Aspizua, R. 2012. Red de Estaciones meteorológicas multiparamétricas. En: Aspizua, R., Barea-Azcón, J., Bonet, F., Pérez-Luque, A., Zamora, R. (eds.). *Observatorio de Cambio Global de Sierra Nevada: Metodologías de Seguimiento*. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía. Sevilla, España.
- Nakamura, A. et al. 2017. Forests and their canopies: achievements and horizons in canopy science. *Trends in Ecology and Evolution* 32: 438–451.
- Opedal, Ø.H., Armbruster, W.S., Graae, B.J. 2015. Linking small-scale topography with microclimate, plant species diversity and intra-specific trait variation in an alpine landscape. *Plant Ecology and Diversity* 8: 305–315.
- Palade, B., Serrano, M. 2014. Long-term high-frequency validation of MODIS LST products in a Mediterranean mountain environment. *International Journal of Remote Sensing* 35: 818–829.
- Payne, D., Spehn, E.M., Snethlage, M., Fischer, M. 2017. Opportunities for research on mountain biodiversity under global change. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 29: 40–47.
- Peñuelas, J., Sardans, J., Estiarte, M., Ogaya, R., Carnicer, J., Coll, M., et al. 2013. Evidence of current impact of climate change on life: a walk from genes to the biosphere. *Global Change Biology* 19: 2303–2338.
- Pérez-Luque, A.J., Sánchez-Rojas, C.P., Zamora, R., Bonet, F.J. 2015. Cambios temporales en la diversidad, abundancia y fenología de las comunidades vegetales: un estudio de 25 años en los borreguiles. En: Zamora, R., Pérez-Luque, A.J., Bonet, F.J., Barea-Azcón, J.M., Aspizua, R. (eds.). *La huella del cambio global en Sierra Nevada: Retos para la conservación*. pp. 126–128. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Junta de Andalucía. Sevilla, España.
- Pérez-Luque, A.J., Bonet-García, F.J., Zamora Rodríguez, R. 2019. *Map of ecosystems types in Sierra Nevada mountain (southern Spain)*. PAN-GAEA <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.910176>
- Pérez-Luque, A.J., Gea-Izquierdo, G., Zamora, R. 2020. Land-use legacies and climate change as a double challenge to oak forest resilience: mismatches of geographical and ecological rear edges. *Ecosystems*. <https://doi.org/10.1007/s10021-020-00547-y>
- Pérez-Luque, A.J., Benito, B.M., Bonet-García, F.J., Zamora, R. 2021a. Ecological diversity within rear-edge: a case study from Mediterranean *Quercus pyrenaica* Willd. *Forests* 12(1): 10
- Pérez-Luque, A.J., Peinó-Calero, E., Rodríguez-Brito, A., Esteban-Parra, M.J., Merino-Ceballos, M., Guerrero-Alonso, P.D., et al. 2021b. ClimaNevada: Base de datos climática del observatorio de Cambio Global de Sierra Nevada. *Ecosistemas* 30(1): 2155. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2155>
- Potter, K.A., Arthur Woods, H., Pincebourde, S. 2013. Microclimatic challenges in global change biology. *Global Change Biology* 19: 2932–2939.
- Rogora, M., Frate, L., Carranza, M.L., Freppaz, M., Stanisci, A., Bertani, I., et al. 2018. Assessment of climate change effects on mountain ecosystems through a cross-site analysis in the Alps and Apennines. *The Science of the Total Environment* 624: 1429–1442.
- Sánchez-Cano, F.M., Bonet-García, F.J., Pérez-Luque, A.J., Suárez-Muñoz, M., Moreno-Llorca, R. 2017. Wireless sensor networks to assess the impacts of global change in Sierra Nevada (Spain) mountains. En: *Proceedings of the 19th EGU General Assembly, EGU2017, 23-28 April, 2017 in Vienna, Austria.*, p.15060.
- Scherrer, D., Körner, C. 2010. Infra-red thermometry of alpine landscapes challenges climatic warming projections. *Global Change Biology* 16: 2602–2613.
- Scherrer, D., Körner, C. 2011. Topographically controlled thermal-habitat differentiation buffers alpine plant diversity against climate warming. *Journal of Biogeography* 38: 406–416.
- Soranno, P.A., Cheruvilil, K.S., Bissell, E.G., Bremigan, M.T., Downing, J.A., Fergus, C.E., et al. 2014. Cross-scale interactions: quantifying multi-scaled cause-effect relationships in macrosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment* 12: 65–73.
- Stewart, J.R., Lister, A.M., Barnes, I., Dalén, L. 2010. Refugia revisited: individualistic responses of species in space and time. *Proceedings of the Royal Society B - Biological Sciences* 277: 661–671.
- Suggitt, A.J., Wilson, R.J., Isaac, N.J.B., Beale, C.M., Auffret, A.G., August, T., Bennie, J.J., et al. 2018. Extinction risk from climate change is reduced by microclimatic buffering. *Nature Climate Change* 8: 713–717.
- Valverde, J., Calatayud, J., Gómez, J.M., Perfectti, F. 2014. Variación intraestacional en los visitantes florales de *Erysimum mediohispanicum* en Sierra Nevada. *Ecosistemas* 23(3): 83–92.
- Williams, S.E., Shoo, L.P., Isaac, J.L., Hoffmann, A.A., Langham, G. 2008. Towards an Integrated Framework for Assessing the Vulnerability of Species to Climate Change. *PLOS Biology* 6: 1–6.
- Zamora Rodríguez, R., Pérez-Luque, A.J., Bonet García, F.J., Barea-Azcón, J.M., Aspizua, R. 2015. *La huella del cambio global en Sierra Nevada: retos para la conservación*. Junta de Andalucía, Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Granada, España.
- Zamora, R., Pérez-Luque, A.J., Bonet, F.J. 2017. Monitoring Global Change in High Mountains. En: Catalan, J., Ninot, J.M., Aniz, M.M. (eds.), *High Mountain Conservation in a Changing World*, pp. 385–413. Springer International Publishing, Cham, Suiza.
- Zellweger, F., De Frenne, P., Lenoir, J., Rocchini, D., Coomes, D. 2019. Advances in microclimate ecology arising from remote sensing. *Trends in Ecology and Evolution* 34: 327–341.
- Zellweger, F., De Frenne, P., Lenoir, J., Vangansbeke, P., Verheyen, K., Bernhardt-Römermann, M., et al. 2020. Forest microclimate dynamics drive plant responses to warming. *Science* 368: 772–775.