



**LOS ENEBRALES DE LA ALTA MONTAÑA
DE SIERRA NEVADA:
CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN**





Beneficiario Coordinador



Junta de Andalucía
Consejería de Agricultura, Ganadería,
Pesca y Desarrollo Sostenible

Beneficiarios asociados



Junta de Andalucía
Consejería de Agricultura, Ganadería,
Pesca y Desarrollo Sostenible
Agencia de Medio Ambiente
y Agua de Andalucía



PARQUE de las CIENCIAS
ANDALUCÍA - GRANADA



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**



**UNIVERSIDAD
DE ALMERÍA**



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

Coofinanciador



**DANONE
WATERS**

Font
Vella

Lanjarón

Font
Vella

Levitz

FONTER

Los enebrales de la alta montaña de Sierra Nevada: conservación y restauración.
Proyecto LIFE ADAPTAMED (LIFE14 CCA/ES000612), acción E1.

Autores: Regino Zamora, José Miguel Barea-Azcón, Antonio Jesús Pérez-Luque, Daniel García, Rut Aspízua y Francisco Javier Cano-Manuel.

Como citar:

Zamora, R.; Barea-Azcón, J.M.; Pérez-Luque, A.J.; García, D.; Aspízua, R. y Cano-Manuel, F.J. (2022). Los enebrales de la alta montaña de Sierra Nevada: conservación y restauración. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible (Junta de Andalucía)-Universidad de Granada. 89 pp.

Créditos fotográficos: Jean Yves Rasplus (foto 7 c), Antonio Jesús Pérez Luque (foto 7 a, b, d, e y f), Isaac Cortes Ruiz (foto 8), Francisco Bruno Navarro Reyes (foto 10) y José Miguel Barea Azcón (resto de fotos).

URI: <http://hdl.handle.net/10481/73929>

D.L.: GR 573-2022

Diseño gráfico y maquetación: Creados Visual S.L. (Granada)

Impresión: Solprint S. L. (Málaga)

LOS ENEBRALES DE LA ALTA MONTAÑA DE SIERRA NEVADA: CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN



Ilustración: Daniel García

ÍNDICE

Prólogo	6
<hr/>	
1. Introducción	8
<hr/>	
2. Caracterización de los enebrales de Sierra Nevada	11
2.1. Generalidades	12
2.2. Biodiversidad asociada al enebral	15
2.3. Historia natural del enebro	19
2.4. Ecología de los enebrales	22
2.5. Servicios ecosistémicos que proporciona el enebral	34
<hr/>	
3. El enebral en el Antropoceno: impactos del cambio climático y de los cambios de uso del territorio	43
3.1. Cambio climático y migración altitudinal	44
3.2. Perturbaciones de origen antrópico en los enebrales	47
3.3. Enseñanzas del proceso de restauración natural	48
<hr/>	
4. Experiencias en el marco del proyecto Life Adaptamed	53
4.1. Si la regeneración natural es muy lenta, ¿podemos ayudar a acelerar el proceso?	54
4.2. Experimento de siembras	55
4.3. Experimento de plantación	58
4.4. Lecciones aprendidas en las actuaciones del proyecto Life Adaptamed y recomendaciones de gestión	62
<hr/>	

5. Enseñanzas para la conservación y restauración	65
5.1. Restauración de zonas degradadas (incendios, carriles y pistas de esquí)	66
5.2. Restauración activa: siembras y plantaciones ante la incertidumbre climática	67
5.3. Las soluciones basadas en la naturaleza como mejor estrategia para la adaptación	72
5.4. Síntesis de recomendaciones	74
<hr/>	
6. Referencias	79
<hr/>	
7. Glosario de términos	85
<hr/>	

PRÓLOGO

El proyecto Life Adaptamed aborda, como objetivo principal, la adaptación al cambio climático de los ecosistemas mediterráneos del sur de Europa, en especial en Sierra Nevada y sus ecosistemas representativos de alta montaña, con el objetivo de proteger los servicios ecosistémicos ante un escenario de cambio climático con medidas de gestión adaptativa.

El cambio climático es uno de los principales problemas al que se enfrentan los espacios protegidos y los bienes y servicios que aportan. A través de medidas de gestión adaptativa, que implican el manejo de hábitats para incrementar su resistencia y resiliencia ante los efectos del cambio climático y otras perturbaciones, se pretende mejorar la capacidad de provisión de bienes y servicios.

El Life Adaptamed de Sierra Nevada, desarrollado en la Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible, es un proyecto con un marcado componente de servicio social. Para ello ha trabajado en desarrollar, implementar, monitorear, evaluar y difundir medidas de gestión adaptativa, orientadas a garantizar la provisión de servicios ecosistémicos clave y se ha materializado, entre otras actividades, en la edición de diversos manuales que faciliten los trabajos de conservación de los servicios ecosistémicos, como el dedicado a los robledales o el que hoy tienen entre sus manos, cuyo objeto son los enebrales y, por extensión, los matorrales de alta montaña.

El enebro y la comunidad vegetal acompañante es uno de los ecosistemas más singulares de Sierra Nevada. Estos ecosistemas aparecen a lo largo de casi 35.000 hectáreas distribuidas entre los 1.800 y los 2.800 m de altitud, formando una orla que transcurre desde el límite del arbolado hasta donde comienzan los singulares roquedos y pastizales característicos del criomediterráneo. En su conjunto, a esta formación se le conoce como matorrales de alta montaña y está incluido en el anexo I de la Directiva Hábitat con el nombre de 'Formaciones Montanas de *Cytisus purgans*' (Hábitat 5120).

El enebro (*Juniperus communis* L.) es una de las especies más características de estos ambientes y en consecuencia una de las que mayor contribución presenta a la hora de mantener las funciones esenciales de los matorrales de alta montaña de Sierra Nevada. Estos enebrales se encuentran justo al límite de su área de distribución y, en consecuencia, se trata de poblaciones considerablemente sensibles a multitud de perturbaciones. Entre estas perturbaciones destaca el cambio climático, el cual implica que cada vez sea más frecuente la presencia de periodos secos en los cuales la capacidad de regeneración del enebro se ve muy mermada, prácticamente paralizada. Igualmente, entre estos factores destaca la reducción de poblaciones de aves que contribuyen a dispersar sus semillas, como es el mirlo capiblanco, una especie de túrdido (mirlos y zorzales) que no se reproduce en Sierra Nevada pero que cada otoño aparece en grandes bandos para consumir y dispersar las semillas de esta planta.

El Observatorio de Cambio Global de Sierra Nevada, proyecto de la Consejería con la Universidad de Granada para evaluar los impactos del cambio global y fomentar la resiliencia de los ecosistemas, ha evidenciado un escenario de incertidumbre climática y, por ello, de reducción de la capacidad dispersiva del enebro, por lo que se hace necesario inferir estrategias de gestión basadas en el mejor conocimiento disponible a fin de procurar un fomento en la capacidad de autoorganización de estos singulares ecosistemas.

Las recomendaciones que el lector podrá encontrar a lo largo de las páginas del presente manual podrían ser calificadas en ocasiones de complejas. Un ejemplo de ello son las actuaciones de siembra y plantación, que requieren de periodos largos de tiempo acompañados de una inversión nada desdeñable de esfuerzo. Esto nos hace concluir que la estrategia más recomendable es centrarse en preservar los pies de planta existentes actualmente. Conservar el enebro es mucho más rentable que restaurarlo. Sin embargo, esta restauración ha de ser afrontada de forma ineludible en determinados casos y, para ello, este manual aporta las pautas a seguir.

De entre las páginas de este manual también emerge con fuerza una realidad que se consolida como una de las prioridades para la conservación de la biodiversidad en la montaña: el mantenimiento de los usos tradicionales. En no pocas ocasiones, estos usos se convierten en verdaderas ‘Soluciones Basadas en la Naturaleza’ que deben de ser aprovechadas como elementos insoslayables en los procesos de gobernanza.

Comprobado que los enebros situados en zonas alteradas por el hombre han crecido más que aquellos ubicados en zonas no alteradas, que los que se desarrollan asociados a sabinas, agracejos o piornos experimentan mayor crecimiento que los aislados y que las tradicionales acequias de careo proporcionan la humedad edáfica necesaria para el desarrollo de semillas y plántulas, se pueden definir las líneas de trabajo para la recuperación del matorral de alta montaña, teniendo en cuenta las adaptaciones que se están produciendo debido a los cambios altitudinales derivados de la evolución climática.

De entre estos factores cabe resaltar el papel que juegan las acequias de careo, que reúnen todos los ingredientes necesarios para ser consideradas como una herramienta auxiliar de primer orden para la conservación de los enebrales de Sierra Nevada y su vegetación asociada. Estas infraestructuras centenarias se han mantenido gracias al saber popular y a una agricultura de montaña y, a día de hoy, se ha demostrado su sobrada capacidad para mitigar los impactos del cambio climático en las cada vez más áridas laderas de la Sierra. La redistribución y ralentización del agua mediada por estas acequias de la alta montaña supone un ejemplo de adaptación que ha de ser mantenido, y en ocasiones recuperado, como solución basada en la naturaleza.

Este manual también es un buen ejemplo de trabajo multidisciplinar entre investigadores de la Universidad de Granada, técnicos del Parque Nacional, Parque Natural y Reserva de la Biosfera de Sierra Nevada, de la Agencia de Medio Ambiente y Agua y Agentes de Medio Ambiente y Celadores Forestales, que además recoge entre sus páginas la experiencia y la sabiduría de pastores, acequeros y otros habitantes de estos fascinantes paisajes, en la confianza de que el conocimiento científico sea base de las decisiones que han de tomarse en la gestión de los espacios protegidos.

Francisco de Asís Muñoz Collado
Director del Parque Nacional y Parque Natural de Sierra Nevada

INTRODUCCIÓN

Los problemas ambientales generados por el cambio global constituyen el principal problema al que se enfrenta la sociedad contemporánea. Para la cuenca Mediterránea, muchos modelos climáticos predicen temperaturas más altas, menos precipitaciones y un aumento general de la variabilidad climática, con eventos de temperatura y precipitación más extremos¹. Como resultado, la Región Mediterránea se considera uno de los puntos críticos de cambio climático más importantes del mundo^{2,3}. Los efectos del cambio climático se ven agravados por los cambios de usos del suelo en los ecosistemas mediterráneos⁴. El desafío actual de la gestión ambiental es incorporar el cambio global como nuevo paradigma, tanto en el marco conceptual como en las acciones concretas, promoviendo la adaptación y resiliencia de las comunidades ante los nuevos escenarios de cambio.

En la actualidad existe un cuerpo de conocimiento científico y una capacidad tecnológica suficiente para orientar una gestión ambiental eficaz en la mayoría de los ecosistemas del planeta. Tanto la adaptación a las nuevas condiciones como la conservación y explotación sostenible de los sistemas naturales pueden llevarse a cabo si se utilizan los conocimientos científicos existentes. Sin embargo, la transformación de la evidencia científica en “conocimiento utilizable” para la gestión ambiental no es automática ni sencilla⁵. Tradicionalmente, muy pocas decisiones de política ambiental se han basado en información contrastada científicamente⁶. Un problema adicional es que, con demasiada frecuencia, las experiencias de gestión desarrolladas en países científica y tecnológicamente avanzados se han trasladado a otras regiones con diferentes condiciones ecológicas (clima, comunidades bióticas, grado de impacto humano), como es el caso de los ecosistemas mediterráneos. Los resultados negativos indican claramente que la mayoría de los protocolos de gestión derivados de las investigaciones realizadas en ecosistemas templados y boreales no son aplicables al manejo y conservación en ambientes mediterráneos^{7,8,9}.

La conservación y restauración de los enebrales montanos en ambientes mediterráneos ejemplifica muy bien la problemática descrita anteriormente. *Juniperus communis* L. (enebro común) es una gimnosperma muy extendida en el Holártico, pero su distribución se fragmenta progresivamente hacia el sur de Europa, donde se ubica exclusivamente en zonas de alta montaña¹⁰. En Sierra Nevada, aparece principalmente en laderas orientadas al norte, entre 1.800 y 3.000 m de altitud. Los enebrales tienen un alto valor ecológico debido a su capacidad para retener suelos y su abundante flora y fauna endémica asociada¹¹.

Así, estos matorrales de alta montaña forman parte de la Directiva Hábitat (código 5120, Formaciones de montaña *Cytisus purgans*, Anexo I 92/43/CEE).

Los enebrales de Sierra Nevada han sido sometidos a diversos tipos de perturbación antrópica durante siglos, provocando una regresión en su área de distribución¹². Los enebrales, se han quemado tradicionalmente para aumentar la superficie de pasto. En las últimas décadas, y en localidades concretas, los enebrales han sido arrancados para la construcción de pistas de esquí y carriles de acceso. Estas alteraciones han provocado una considerable reducción y fragmentación del área de distribución del enebral en Sierra Nevada, agravando sus problemas de regeneración en el actual contexto de cambio climático.

Hemos abordado la restauración de los enebrales de Sierra Nevada en el marco del proyecto Life Adaptamed, que tiene como objetivo favorecer la adaptación al cambio climático de ecosistemas terrestres representativos en tres áreas protegidas mediterráneas, que recogen un amplio gradiente ambiental en Andalucía: Sierra Nevada, Cabo de Gata y Doñana. El proyecto Life Adaptamed se centra en desarrollar, implementar, monitorear, evaluar y difundir medidas de gestión adaptativa, centradas en asegurar la provisión de servicios ecosistémicos clave como la retención de suelos, producción de pastos, conservación y puesta en valor de la biodiversidad, depuración y almacenamiento de agua, prevención de incendios forestales y reducción de la desertificación. Para ello, las acciones del proyecto van dirigidas a aumentar la resiliencia de los ecosistemas ante el cambio climático y otras presiones de origen antrópico, fomentando los mecanismos naturales de autoorganización.



Foto 1. Enebral en la cabecera del Valle del río San Juan, con el pico Veleta al fondo.





02

**CARACTERIZACIÓN DE LOS
ENEBRALES DE SIERRA NEVADA**

2.1. GENERALIDADES

Las zonas montañosas de la cuenca Mediterránea atesoran la mayor diversidad botánica de Europa y una de las mayores riquezas en especies vegetales de toda la Tierra^{13,14}. Las montañas mediterráneas son islas ecológicas que guardan, en sus hábitats más húmedos y fríos, poblaciones aisladas de especies que se expandieron hacia Europa meridional durante las glaciaciones.

El enebro, una gimnosperma ampliamente extendida en el Holártico, es un claro ejemplo de este patrón de distribución geográfica¹⁵. En la Península Ibérica el enebro se extiende de forma más o menos continua por el Pirineo y la franja cantábrica, pero su distribución se fragmenta progresivamente hacia el sur, donde se localiza exclusivamente en las zonas de alta montaña. Estas poblaciones mediterráneas aparecen sobre sustratos calizos, entre los 1.600 y los 2.200 m, en el límite superior de los bosques abiertos de pino albar (*Pinus sylvestris*) o pino laricio (*Pinus nigra*), o bien participan en formaciones arbustivas de alta montaña junto a diversas especies de porte almohadillado. A mayores altitudes, como en Sierra Nevada, aparecen entre los 1.800 y los 3.000 m, fundamentalmente sobre sustrato silíceo. En estas zonas, el enebro forma los denominados enebrales-piornales, junto al piorno amarillo (*Genista versicolor*) y otras especies de piornos.



Foto 2. Enebro en la cabecera del río Alhama (Dehesa del Camarate, Sierra Nevada).

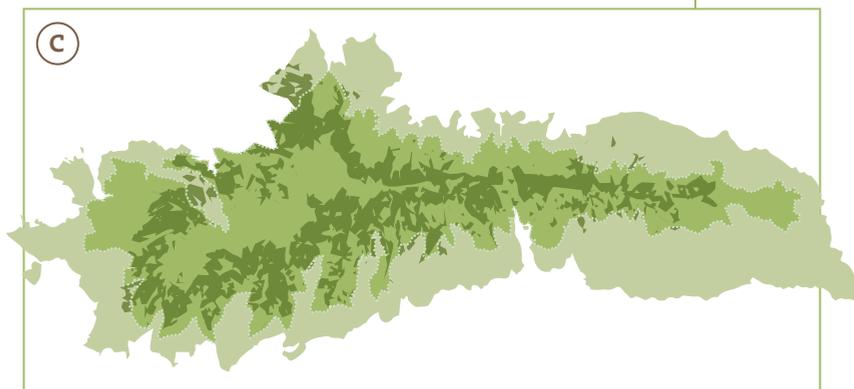
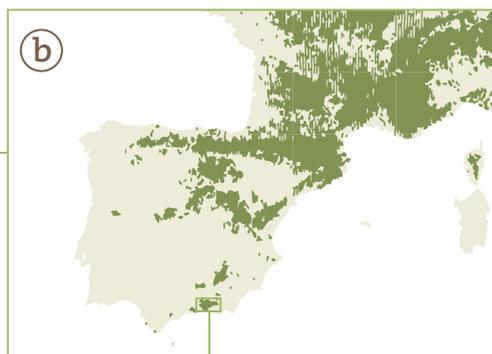


Figura 1. Distribución del enebro:

a) A nivel global (extraído de wikipedia),

b) Suroeste de Europa (datos descargados de GBIF¹⁶)

c) Sierra Nevada (extraído de¹⁷).



- Distribución de *Juniperus communis*
- Parque Nacional de Sierra Nevada
- Parque Natural de Sierra Nevada

2. CARACTERIZACIÓN DE LOS ENEBRALES DE SIERRA NEVADA

Los enebrales de Sierra Nevada han recibido escasa atención en comparación con otras comunidades vegetales más ricas en especies endémicas de la alta montaña, a pesar de la importancia potencial de estos matorrales como reservorios de biodiversidad y proveedores de múltiples servicios ecosistémicos. Ante esta falta de información, en las últimas décadas hemos realizado una serie de estudios encaminados a recopilar información científica detallada para comprender las claves ecológicas que nos ayuden a conservar y restaurar los enebrales de Sierra Nevada.

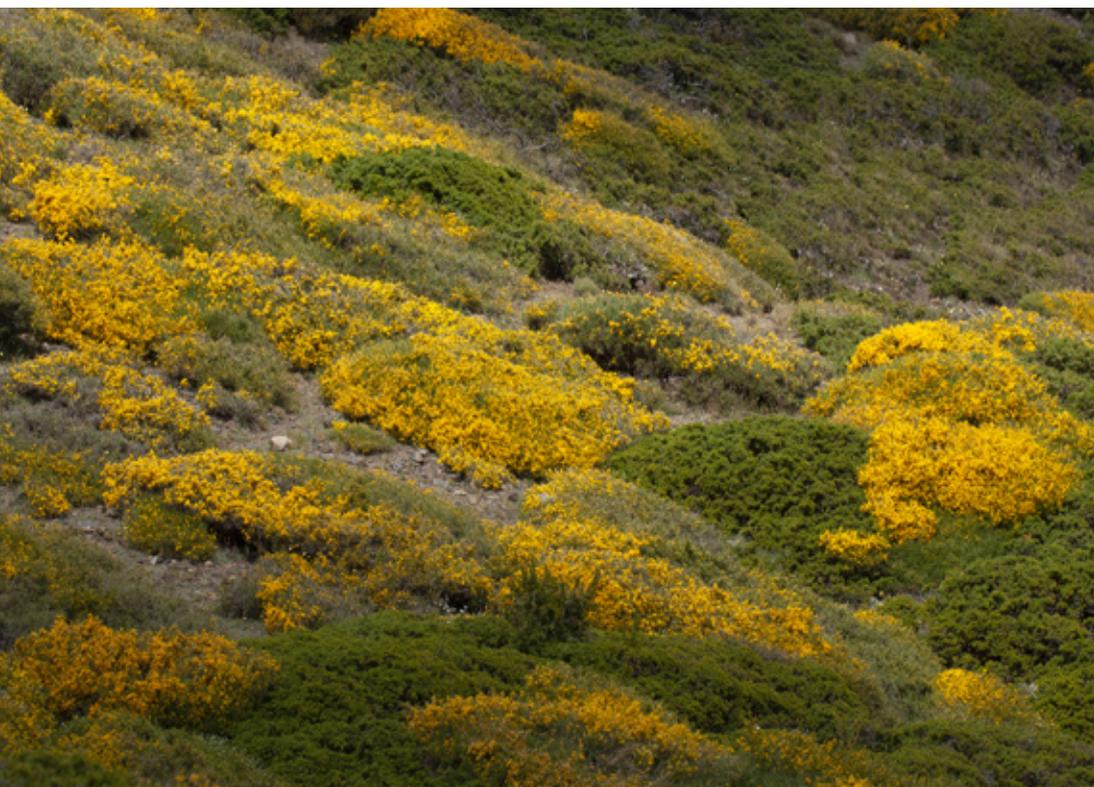


Foto 3. Ejemplares de enebros entre los piornos en flor.

2.2. BIODIVERSIDAD ASOCIADA AL ENEBRAL

BIODIVERSIDAD VEGETAL

Los enebrales aparecen en el sector Nevado-Filábride de Sierra Nevada, por encima de los 1.800-1.900 m y hasta 2.800 m (3.000 m en orientaciones sur), desarrollándose sobre materiales pobres en bases (micaesquistos o cuarcitas). La comunidad vegetal es una formación de enebral-piornal, constituida por enebros (*Juniperus communis* subsp. *nana* y subsp. *hemisphaerica*), sabinas (*Juniperus sabina*), agracejos (*Berberis hispanica*) y piornos como *Genista versicolor* y *Cytisus galianoi*. En algunos lugares aparecen otras especies arbustivas como *Hormathophylla spinosa* o *Erinacea anthyllis*. Actualmente, tanto los enebros como las sabinas se presentan sólo en algunos sectores, por lo que los piornales dominan ampliamente.

El manejo tradicional del enebral-piornal ha supuesto la quema de estas comunidades arbustivas para conseguir un pastizal de mayor interés para la ganadería, donde predominan las gramíneas como *Festuca indigesta*, *Deschampsia flexuosa* subsp. *iberica*, *Avenula laevis*, *Koeleria crassipes* subsp. *nevadensis*, *Corinephorus canescens*, etc., acompañadas por *Jurinea humilis*, *Arenaria tetraquetra* subsp. *amabilis*, *Leontodon boryi*, *Leucanthemopsis pectinata*, *Senecio boissieri*, *Jasione crispa* subsp. *amethystina*, etc.^{11, 14}.

En lugares con mayor pendiente y sobre suelos menos desarrollados aparecen tomillares con especies como *Thymus serpylloides*, *Sideritis glacialis*, *Arenaria pungens* subsp. *pungens*, *Astragalus sempervirens* subsp. *nevadensis*, *Scabiosa turolensis*, *Erysimum baeticum*, *E. nevadense*, *Anthyllis vulneraria* subsp. *pseudoarundana* y *Acinos alpinus* subsp. *meridionalis*, entre otras. En zonas de cumbres, esta comunidad se enriquece con especies tales como *Astragalus nevadensis*, *Poa ligulata*, *Erodium cheilanthifolium* y *Androsace vitaliana* subsp. *nevadensis*. En zonas que han sufrido una alteración drástica, normalmente por movimiento de tierras, aparece un cardal en el que dominan las compuestas espinosas; algunas especies son endémicas, como *Carduus carlinoides* subsp. *hispanicus*, *Reseda complicata*, *Dactylis juncinella*, *Eryngium glaciale* o *Verbascum nevadense*, junto a otras de distribución más amplia como *Cirsium acaule* subsp. *gregarium*, *Marrubium supinum*, *Cirsium odontolepis*, *Eryngium bourgatii* o *Artemisia absinthium*^{11, 14}. En las últimas décadas, debido a la apertura de carriles, pistas de esquí o carreteras, estas comunidades se han extendido de forma notable por la alta montaña a lo largo de estas estructuras lineales.

También encontramos enebrales-sabinares en el sector dolomítico de Sierra Nevada, ocupando reducidas extensiones por encima de 1.800 m, en las proximidades de los picos Trevenque, Tesoro y Dornajo y en el collado de las Sabinas.

BIODIVERSIDAD ANIMAL

Los enebrales se localizan en Sierra Nevada por encima del límite forestal de los robledales y pinares. Un patrón altitudinal habitual en Sierra Nevada (y otras montañas de ambientes templados) consiste en que, desde el límite de distribución altitudinal que ocupa el enebral hacia la zona de cumbres, la diversidad animal va paulatinamente decreciendo debido a las restricciones que impone el clima de la alta montaña. Aun así, los enebrales siguen reteniendo una buena fracción de la diversidad animal de Sierra Nevada, destacando la presencia de diferentes elementos endémicos que encuentran en el enebral su hábitat idóneo.

Los vertebrados son el grupo de animales mejor conocido (alrededor de 90 especies), destacando las aves entre ellos. En los enebrales de Sierra Nevada se ha descrito una comunidad de aves compuesta por aproximadamente 50 especies. Se trata de comunidades sujetas a una importante dominancia de unas pocas especies entre las que cabe citar, como especies más abundantes, el colirrojo tizón (*Phoenicurus ochruros*), la tarabilla europea (*Saxicola rubicola*), la alondra (*Alauda arvensis*), la collalba gris (*Oenanthe oenanthe*) o el escribano montesino (*Emberiza cia*). También es abundante en estos ambientes la perdiz roja (*Alectoris rufa*), que además es el sustento principal del águila real (*Aquila chrysaetos*).



Foto 4. La collalba gris es una de las aves más características de los enebrales de Sierra Nevada.

En las últimas cuatro décadas se ha constatado un descenso importante de las poblaciones de aves paseriformes en el enebro, reduciéndose la densidad de 28 a 17 aves/10 ha según se desprende del estudio de una localidad situada en la vertiente norte¹⁸. Durante el periodo de otoño, parte del invierno y comienzo de la primavera, los enebrales de Sierra Nevada son visitados por bandos (cada vez menos nutridos) de mirlos capiblanco (*Turdus torquatus*) (ver punto 2.4, importancia de las interacciones ecológicas). La comunidad de mamíferos está formada por pocas especies, dadas las limitaciones que impone la alta montaña. En el límite inferior de la distribución altitudinal del enebro esa diversidad es mayor y podríamos decir que está constituida por 20 especies (algo así como la mitad de las descritas en toda Sierra Nevada, que son 43). En total, 2 artiodáctilos, 4 carnívoros, 6 quirópteros, 2 insectívoros (*Eulipotyphla*), 1 lagomorfo y 5 roedores. Destacan la población de cabra montés (*Capra pyrenaica hispanica*) o la singularidad de especies como el topillo nival (*Chionomys nivalis*), un roedor cricétido que habita en colonias asociadas a canchales pero que utiliza el enebro como hábitat en donde conseguir alimento y protección.



Foto 5. El sapo partero bético es un endemismo del sudeste ibérico cuya presencia en los enebrales de Sierra Nevada se debe a la existencia de puntos de agua como pequeñas charcas, manantiales y, sobre todo, acequias tradicionales.

Respecto a los herpetos, tan solo se pueden adscribir tres especies de anfibios y al menos seis especies de reptiles a estos ambientes. Los anfibios presentes en el enebral son el sapo partero bético (*Alytes dickillenhi*), que utiliza algunas balsas y acequias tradicionales ubicadas en la alta montaña para reproducirse, el sapo común (*Bufo spinosus*) y el sapo corredor (*Bufo calamita*). Entre los reptiles destacan el lagarto ocelado (*Timon lepidus*), la culebra bastarda (*Malpolon monspessulanus*), la víbora hocicuda (*Vipera latastei*) y las lagartijas ibérica y colilarga (*Psammodromus hispanicus* y *P. algyrus*). Mención aparte merece las dos culebras lisas: la europea (*Coronella austriaca*) y la meridional (*Coronella girondica*). La culebra lisa europea en concreto es uno de los animales más emblemáticos del oro y crioromediterráneo en Sierra Nevada, representando el tipo de organismo que actualmente tiene un área de distribución local muy restringida tras los máximos de los periodos glaciares. La fauna invertebrada es mucho menos conocida a excepción de grupos concretos como determinadas familias de coleópteros, ortópteros y las mariposas diurnas. Respecto a este último grupo taxonómico, los datos del Observatorio de Cambio Global de Sierra Nevada han permitido registrar un total de 70 especies en este ecosistema. Entre estas cabe destacar a *Polyommatus golgus* por su carácter endémico y de especie amenazada (incluida en los Anexos II y IV de la Directiva Hábitat y en la categoría de En Peligro en los Catálogos Español y Andaluz de Especies Amenazadas) y a *Erebia hispania*, una especie estrictamente endémica de Sierra Nevada cuyas poblaciones se asocian de forma muy estrecha a los enebrales y sabinares de Sierra Nevada. Las poblaciones más importantes de *Parnassius apollo nevadensis* se encuentran en los enebrales nevadenses. Esta especie es uno de los insectos más emblemáticos de estas montañas y aún se presenta en densidades elevadas en algunos lugares ubicados entre los 1.800 y los 2.500 m.



Foto 6. La mariposa apolo de Sierra Nevada es una especie muy representativa de la entomofauna de Sierra Nevada. El dominio del enebro coincide en buena medida con el área en donde se concentran la mayor parte de las poblaciones.

2.3 HISTORIA NATURAL DEL ENEBRO

El enebro es una planta dioica (sexos separados) que depende del viento para polinizarse. Las hembras producen conos axilares (pequeñas piñas que brotan en la base de las acículas) que tardan más de dos años en desarrollar arcéstidas o gábulos carnosos (los “frutos” del enebro). El proceso de formación de las arcéstidas puede describirse en 3 fases¹⁹ (Fig. 2): 1) polinización y fecundación diferida del cono inicial, desde la primavera del primer año hasta la primavera del segundo año, 2) crecimiento de la arcéstida, desde la primavera al otoño del segundo año, y 3) maduración de la arcéstida, desde el otoño del segundo año al otoño del tercer año, cambiando el color de la arcéstida de verde a azul pruinoso en septiembre del tercer año. Las arcéstidas maduras contienen de una a tres, excepcionalmente cuatro, semillas. Los conos se producen anualmente, por lo que es posible encontrar simultáneamente en una misma planta hembra conos iniciales, arcéstidas verdes y arcéstidas ya maduras.

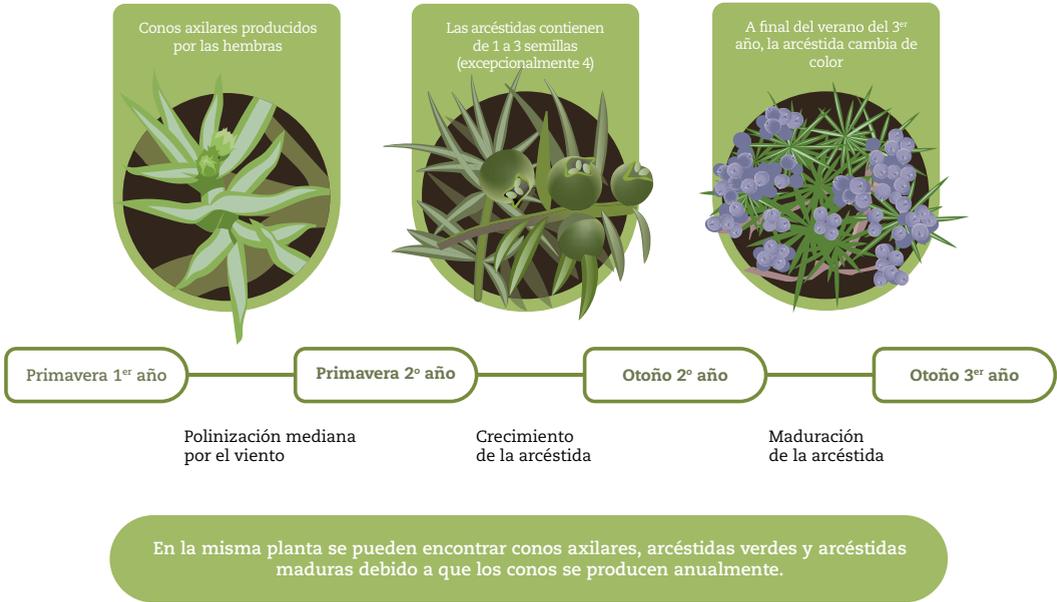


Figura 2. Proceso de formación de las arcéstidas.

El enebro sufre procesos de aborto en los conos iniciales y en las arcéstidas verdes^{19,20}. Las semillas de las arcéstidas abortadas son todas inviables, al igual que muchas de las semillas que se desarrollan en las arcéstidas maduras. El endospermo de las semillas abortadas ocupa sólo parcialmente la cavidad de la semilla, mientras que, en las semillas sanas, el endospermo ocupa toda la cavidad de la semilla. La producción de arcéstidas y semillas de enebro muestra una fuerte variabilidad interanual, en parte debida a las condiciones climáticas en el momento de la polinización²¹. Localmente, varía en función de la disponibilidad de agua y nutrientes del hábitat donde crece el enebro, siendo mayor la producción de arcéstidas en los hábitats más húmedos de la alta montaña, como la proximidad a los arroyos y borreguiles¹².

Los enebrales montanos de Andalucía ocupan el límite inferior de la distribución del enebro en Europa. Sin embargo, estas poblaciones situadas en el límite geográfico de distribución quedan fuera de las condiciones ecológicas que necesita el enebro para mantener una regeneración poblacional activa. De hecho, las poblaciones de enebro en Andalucía sufren una tasa de aborto de semillas superior a las restantes poblaciones situadas en el resto de España y Europa¹⁰.

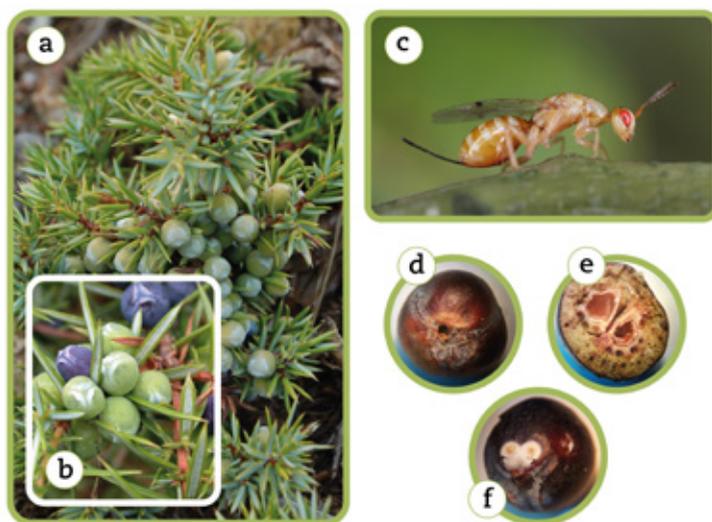


Foto 7. Frutos (arcéscidas) del enebro (a), arcéscidas infestadas (b) por el himenóptero *Megastigmus bipunctatus* (*M. pistaciae* en la foto, de aspecto muy similar) (c). Detalle del orificio de salida originado por el insecto (d), semillas abortadas y arcéscida infestada por el hemíptero *Carulaspis juniperi* (f).

Esta diferencia se explica en términos biogeográficos, al ser poblaciones donde coincide una situación de aislamiento geográfico con un fuerte estrés ambiental climático.

Las semillas de enebro son atacadas por una avispa depredadora de semillas *Megastigmus bipunctatus* (Hymenoptera, Torymidae), un insecto de apenas 5 mm de longitud. Estas avispas emergen de las arcéscidas en fase de maduración desde final de junio a mediados de julio, se aparean, y las hembras ovipositan en las arcéscidas que en ese momento se encuentran en desarrollo, antes de que se endurezca la pared de las semillas. Las hembras ponen un huevo por semilla, y la larva emerge como adulto en el verano siguiente, abandonando la arcéscida a través de un agujero circular, pequeño pero bien visible, en la pared de la semilla y de la arcéscida^{22, 23, 24}.

Durante el primer año de desarrollo, las arcéscidas pueden ser atacadas por *Carulaspis juniperi* (Hemiptera, Diaspididae), una cochinilla sésil que aparece pegada a la cubierta de la arcéscida y cubierta por una escama cerosa de color blanco²⁴. Otros insectos que pueden atacar esporádicamente a las arcéscidas y semillas del enebro son *Pammene juniperana* (Lepidoptera, Tortricidae) y *Trisetacus quadrisetus* (Acarina, Eriophyiidae).

2.4. ECOLOGÍA DE LOS ENEBRALES

Las investigaciones de campo realizadas en Sierra Nevada han proporcionado información crucial para planificar la conservación y restauración del enebro con criterios científicos. Los enebros adultos en Sierra Nevada muestran una gran resistencia a la sequía estival, así como al ramoneo y pisoteo de herbívoros^{25, 26}. Resisten también muy bien el peso de la nieve que se acumula sobre ellos durante el invierno (Fig. 3).

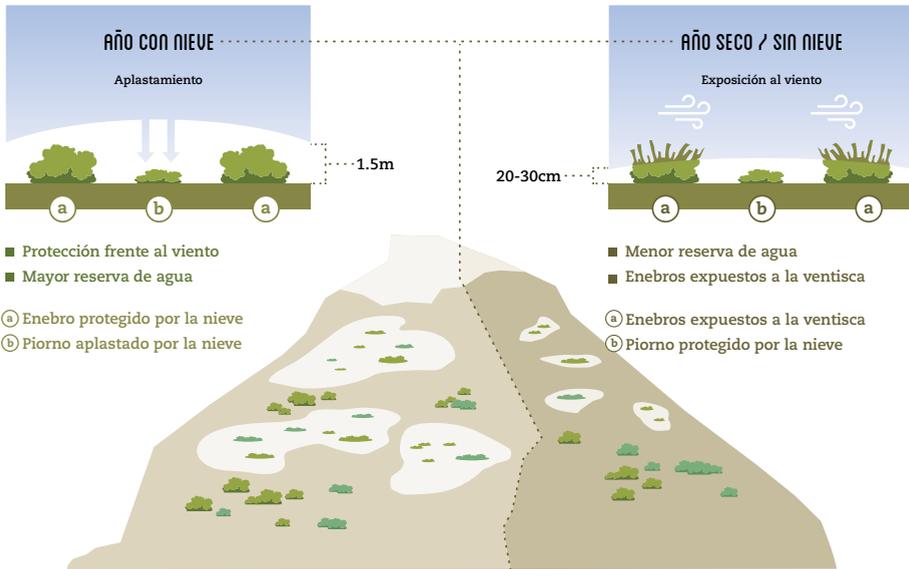


Figura 3: Esquema que muestra las consecuencias del espesor de la capa de nieve para el enebro y el piorno. Los años en que se acumula mucha nieve durante el invierno, esta cubre al enebro pero no llega a aplastarlo, protegiéndolo de la ventisca y proporcionando una importante reserva de agua durante el siguiente verano. En estas mismas condiciones, el piorno puede morir aplastado por el peso de la nieve, siendo sustituido por un pastizal de gramíneas. Por el contrario, cuando hay muy poca nieve (la situación cada vez más frecuente), esta no acaba de cubrir completamente a los enebros, cuya copa queda expuesta a la ventisca, quedando muy dañada. El piorno no muere por aplastamiento, por lo que va incrementándose la cobertura del piornal en detrimento del pastizal y enebro. La reserva de agua para el verano es mínima, lo que también favorece al piorno frente al enebro.

Sin embargo, los enebros apenas regeneran sus poblaciones en la montaña mediterránea, siendo frecuentes los individuos de gran tamaño, muchos de ellos senescentes (algunos superan los 20 m de diámetro), mientras que son muy escasas las plántulas e individuos juveniles^{10,12}. Las semillas de enebro tienen una gran dificultad para germinar y sus plántulas para sobrevivir en las condiciones ecológicas actuales de las altas montañas del Mediterráneo²⁷. Esta situación es contraria a la que ocurre en latitudes más septentrionales, con veranos mucho más húmedos, donde las poblaciones de enebro presentan una alta proporción de plántulas y juveniles¹⁰.

Las observaciones realizadas en otras montañas mediterráneas próximas, como las sierras de Baza (Granada) y Cazorra (Jaén), ponen de manifiesto una situación similar. Este patrón demográfico contrasta fuertemente con el de las poblaciones de enebro que habitan en Escandinavia y los Alpes, donde los juveniles pueden representar el 50% de la población total^{10,28}. Las poblaciones del norte de España se ajustan a un patrón similar al de los enebrales del norte y el centro de Europa. Así pues, en España encontramos dos tipos de estructura de edades diferentes según la región biogeográfica donde se encuentren los enebrales: estructura de edades equilibrada en la región eurosiberiana (norte de España) y muy envejecida en la mediterránea, donde apenas se ven juveniles¹⁰.

Ecología reproductiva y potencial natural de regeneración

Para intentar explicar la aparente incapacidad de renovarse que tienen los enebrales en las montañas mediterráneas, estudiamos en primer lugar su potencial reproductivo. Los resultados de nuestras investigaciones indican que la mayoría de los individuos reproductores producen muchas semillas, a pesar de las fuertes pérdidas que sufren a lo largo de la fase predispersiva. Debido a estas pérdidas, menos del 10% de las semillas producidas por la planta están potencialmente en condiciones de germinar^{29,20}. A pesar de que el 90% de estas semillas abortan o son depredadas por la avispa *M. bipunctatus*, es tan grande la cantidad inicial producida que siempre quedaría una proporción de semillas sanas potencialmente suficiente para que la población se renueve (hasta 600 semillas sanas por planta y año de buena cosecha). De hecho, la proporción de semillas sanas en las poblaciones del norte de España es también muy baja y, no obstante, las poblaciones se renuevan sin problemas.

La dificultad para autoregenerarse de las poblaciones de enebro parece ser, en gran medida, una consecuencia del severo marco abiótico nevadense. Como en otras altas montañas, la sequía fisiológica por frío que ocurre durante los meses

invernales paraliza el crecimiento de las plantas. Sin embargo, en las altas montañas mediterráneas, el crecimiento vegetativo y la regeneración poblacional está también muy limitado durante el verano por la sequía estival. Las semillas del enebro tienen gran dificultad para germinar, y sus plántulas para sobrevivir en las actuales condiciones ecológicas²⁷. Esta situación es opuesta a la que aparece en latitudes más norteñas, con veranos mucho más húmedos, donde la regeneración natural puede incluso verse favorecida por una moderada actividad ganadera, por apertura de huecos en la vegetación herbácea. En estas condiciones, el enebro coloniza con facilidad espacios abiertos, y sus poblaciones pueden presentar una elevada proporción de plántulas y juveniles^{30, 31}.

Importancia de las interacciones ecológicas

La dispersión de las semillas de enebro en zonas de montaña mediterránea corre a cargo de aves del género *Turdus* (Orden Passeriformes, Familia Turdidae=mirlos y zorzales), que consumen las arcéstidas maduras en otoño e invierno y defecan las semillas intactas^{32, 33}. Zorros (*Vulpes vulpes*), garduñas (*Martes foina*) y tejones (*Meles meles*) también dispersan esporádicamente las semillas del enebro. Las principales especies de aves dispersantes son el zorzal charlo (*T. viscivorus*) y sobre todo, el mirlo capiblanco, aunque ocasionalmente también el mirlo común (*T. merula*), el zorzal alirrojo (*T. iliacus*) y el zorzal real (*T. pilaris*). Estas aves acuden a los enebrales de alta montaña en el otoño, dispersando más del 65% del total de semillas producidas cada año. El zorzal charlo aparece en los enebrales desde finales del verano hasta finales de septiembre, debido a los desplazamientos altitudinales que emprende tras reproducirse. En cuanto al mirlo capiblanco, es una especie migradora que utiliza estas áreas de montaña como zonas de invernada y permanece en ellas a lo largo del otoño y, si la nieve es escasa, durante parte del invierno. Una vez que las semillas han sido dispersadas por mirlos y zorzales, pueden ser comidas por el ratón de campo (*Apodemus sylvaticus*), una especie sedentaria en los enebrales que ingiere tanto las semillas de las arcéstidas que caen bajo las plantas como las que diseminan las aves frugívoras. Las semillas dispersadas que logran sobrevivir atraviesan por un periodo de letargo de al menos dieciocho meses antes de su germinación, que ocurre desde el mes mayo hasta principios de julio. Las plántulas recién brotadas pueden identificarse por sus dos cotiledones de color verde oscuro (falsas primeras hojas) y por su tallito verde rojizo.



Foto 8. Mirlo capiblanco (izquierda: hembra, derecha: macho), principal dispersante de las semillas del enebro.

Los enebros proporcionan alimento a las aves frugívoras que consumen sus arcéstidas y dispersan sus semillas. No obstante, la presencia de arcéstidas con semillas depredadas por *M. bipunctatus*, o infestadas por el hemíptero *C. juniperi* podrían condicionar los criterios de selección de las aves dispersantes. Si no hubiera selección, las aves consumirían por igual arcéstidas sanas y dañadas. Por el contrario, si hay selección, el ave consumirá más un tipo de arcéstida que otra. Dependiendo de los criterios selección de las aves frugívoras, la lluvia de semillas (o conjunto de semillas dispersadas y en condiciones para germinar) que generan las aves dispersoras será de mejor, de peor o de igual calidad que el stock de semillas que hay en las plantas, condicionando el mutualismo de dispersión. Para comprobarlo, se realizaron observaciones y experimentos de campo para determinar si las aves seleccionan las arcéstidas sanas en comparación con las infestadas o predadas³². Los resultados indican claramente que las aves frugívoras consumen preferentemente arcéstidas sanas (que son las que tienen una mayor proporción de semillas viables), mientras que rechazan las arcéstidas altamente infestadas por *C. juniperi* y la mayoría de las arcéstidas predadas por *M. bipunctatus*, que por lo general tienen una menor proporción de semillas viables que los frutos los sanos^{32, 34}. El resultado de este consumo selectivo es una mejora de la lluvia de semillas, que contiene una mayor proporción de semillas viables que las que se encuentran en la planta. Al rechazar las aves las arcéstidas infestadas se está reforzando el mutualismo entre el enebro y sus dispersores. Este hecho, unido a la gran cantidad de semillas dispersadas, confirma el papel beneficioso de las aves dispersantes en la regeneración del enebro.

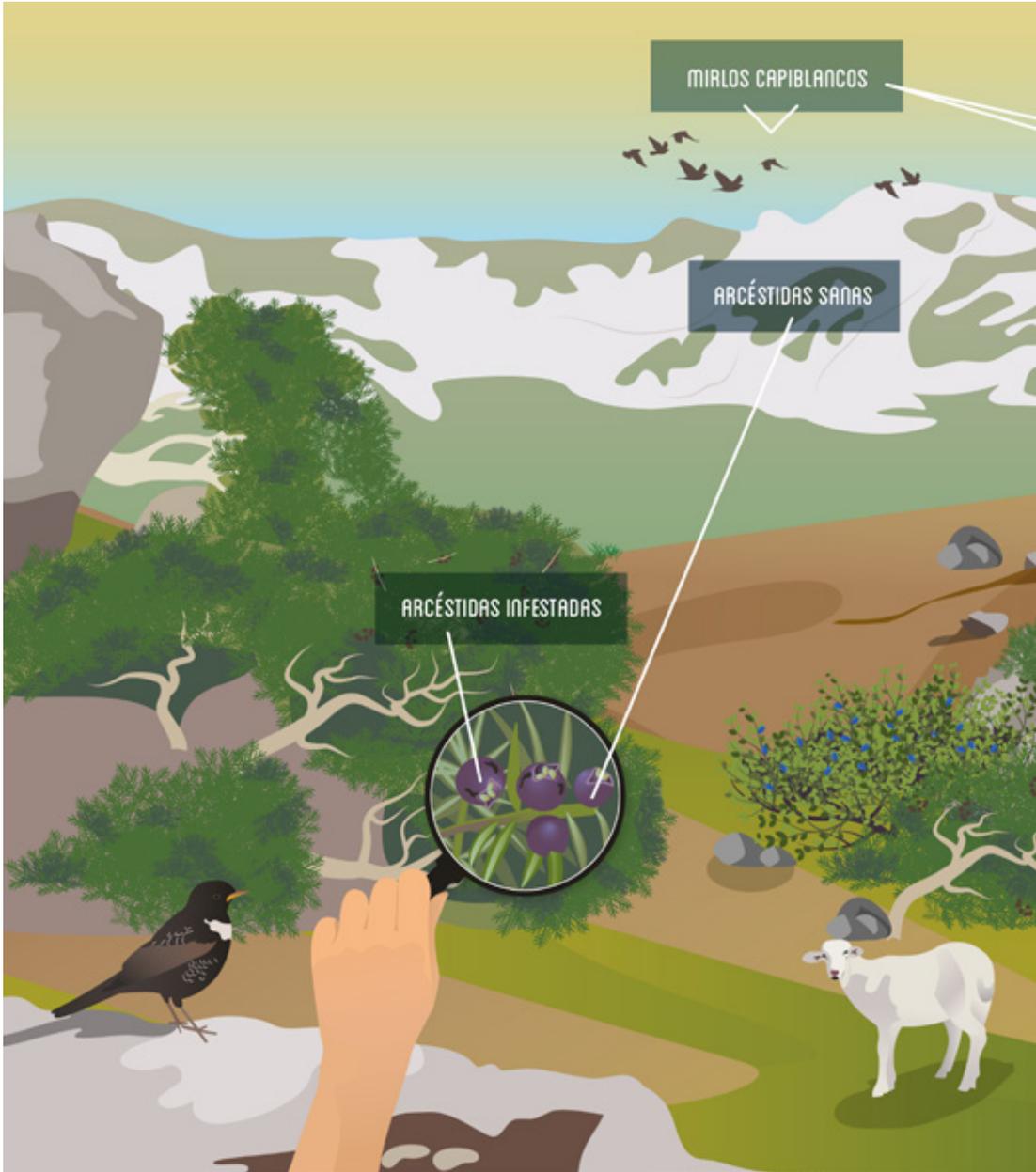
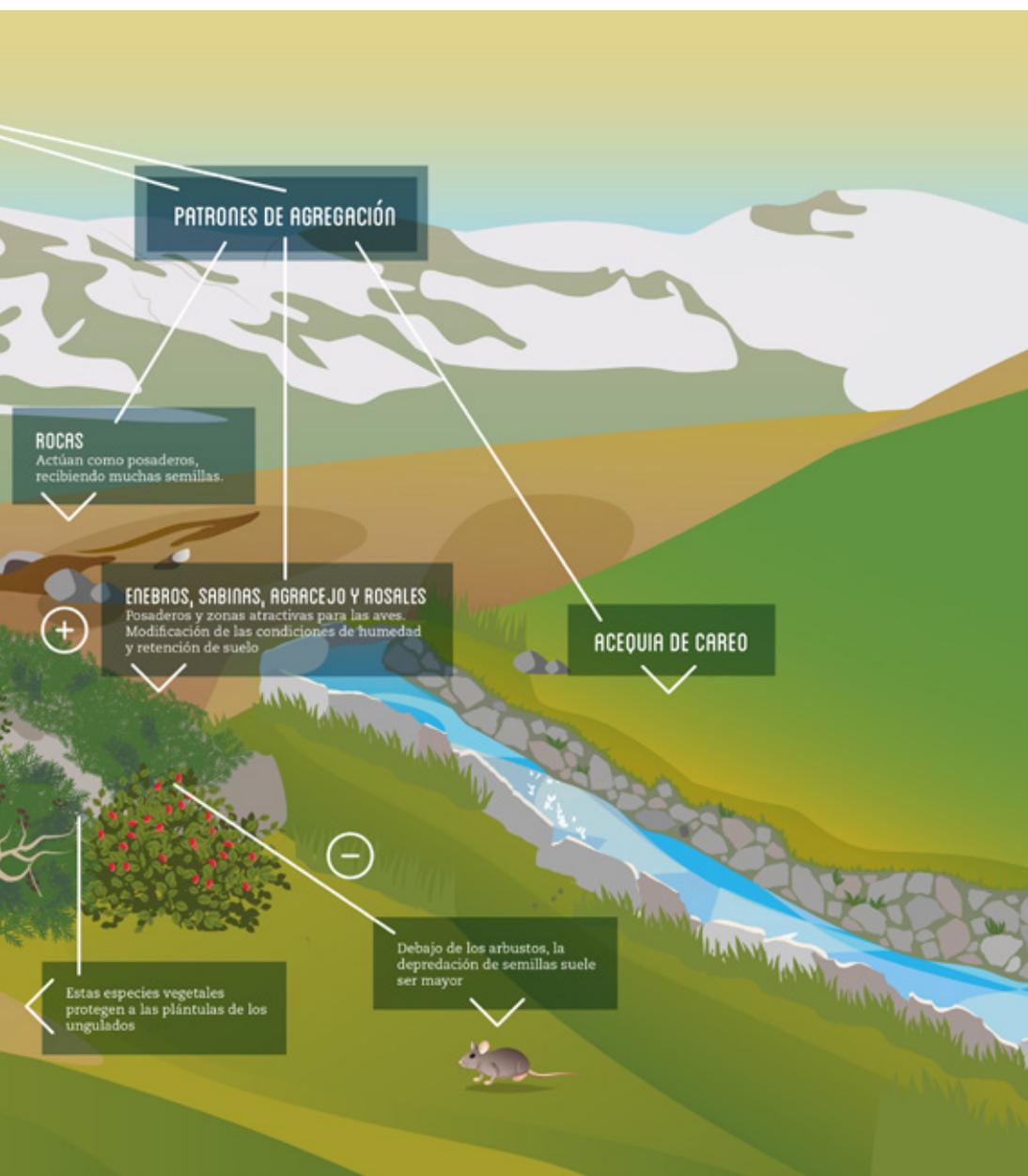


Figura 4. Esquema que muestra al enebro con su red de interacciones planta-animal y planta-planta.



Por otra parte, las aves dispersantes concentran su actividad en determinados sectores de la alta montaña (Fig. 4). Como resultado de su comportamiento, los patrones espaciales de dispersión de semillas suelen mostrar una fuerte heterogeneidad espacial, recibiendo algunos lugares muchas semillas, como las rocas que usan las aves como posaderos, los matorrales productores de fruto carnoso (enebros, sabinas o agracejos) o los bebederos, mientras que otros, como a los espacios abiertos donde predomina el suelo desnudo, no reciben prácticamente ninguna. Este comportamiento espacial de las aves es beneficioso para el enebro, ya que concentran la dispersión de sus semillas precisamente en los ambientes donde el éxito de germinación y establecimiento de plántulas es superior (bajo rocas, proximidad de fuentes de agua y bajo enebros y sabinas).



Foto 9. Aspecto de un enebro en Sierra Nevada donde se enfatizan los diferentes microambientes y su papel en la ecología del enebro. 1: roquedos, 2: agracejos, 3: piornal y 4: acequia. Las grandes rocas son posaderos de aves dispersantes y por lo tanto concentran buena parte de las semillas consumidas. Al igual que en las zonas de influencia de la acequia, en la base de las rocas se producen condiciones de mayor humedad, lo cual incrementa las probabilidades de germinación de las semillas. Los agracejos y otros matorrales también generan oportunidades para la germinación de semillas (mayor humedad y retención de suelo en su interior), también limitan la herbivoría. Por contra, bajo esta vegetación se produce una mayor depredación de semillas por parte de micromamíferos.

En las montañas mediterráneas, la regeneración de un gran número de especies leñosas presenta un patrón espacial asociado a otras plantas ya establecidas (Fig. 4), lo que sugiere un balance neto positivo en las interacciones planta-planta^{35, 36, 37, 38}. Es destacable la importancia de las especies arbustivas para la regeneración de los enebrales de alta montaña, donde las especies dominantes (enebros y sabinas) junto con otras acompañantes, como agracejo, rosál silvestre (*Rosa canina*) y madreSelva arbórea (*Lonicera arborea*), etc, son todas dispersadas por animales, particularmente aves.

En primer lugar, estos arbustos productores de fruto carnoso son comúnmente utilizados como comederos y posaderos por especies de aves frugívoras que dispersan las semillas de muchas otras especies. Si bien la depredación de semillas suele ser mayor debajo de los arbustos³⁹, una gran parte de estas semillas sobrevive, generando núcleos agregados de dispersión de semillas asociados con los enebros^{40, 41, 42}.

En segundo lugar, las copas de los enebros modifican las condiciones microclimáticas, resultando en una mayor humedad del suelo y un mayor aporte de materia orgánica y nutrientes al suelo, creando islas de fertilidad en los pobres suelos de la alta montaña, al tiempo que producen un sombreado que evita el sobrecalentamiento estival. Estos cambios favorecen una mayor abundancia de plántulas bajo los arbustos con respecto al suelo desnudo^{37, 43, 44, 45, 46, 47}, mejorando sus probabilidades de supervivencia incluso en las condiciones más secas^{48, 49}.

Finalmente, los herbívoros ungulados evitan alimentarse de arbustos poco palatables (aquellos con defensas químicas o de bajo valor nutricional, como el enebro) o espinosos^{50, 51} y, en consecuencia, los juveniles de las especies leñosas que crecen bajo estas especies arbustivas están protegidos frente a los ungulados (Fig. 4). Esta asociación es especialmente crítica para especies arbóreas como el tejo (*Taxus baccata*), el serbal (*Sorbus spp.*) o el arce (*Acer spp.*), cuyo nicho de regeneración en Sierra Nevada se limita actualmente a los arbustos con espinas y/o poco palatables, como el agracejo, la sabina o el enebro común, que facilitan el establecimiento de buen número de especies leñosas arbóreas y arbustivas en el límite altitudinal superior del bosque^{37, 41}.

Un caso similar ocurre con la dispersión de frutos del enebro en los sabinares de sabina rastrera del Sistema Ibérico. La sabina rastrera ofrece un buen ambiente para el establecimiento y supervivencia de las plántulas de enebro en la alta montaña mediterránea. Además, ambas especies comparten las mismas aves dispersantes (túrdidos). Pero dado que la sabina es también dioica, como el enebro, resulta que los enebros presentan una mayor asociación espacial con

las sabinas rastreras hembras que con las sabinas macho⁵². Toda esta evidencia implica que la facilitación por arbustos es un proceso fundamental para la regeneración de las especies leñosas del matorral de alta montaña, particularmente en el límite altitudinal inferior del enebroal donde coincide con la orla espinosa y el límite superior altitudinal del bosque de montaña ³⁷.



Foto 10. Arce granatense (*Acer granatensis*) creciendo dentro de un enebro.

La clave para entender lo que pasa: el colapso en el reclutamiento demográfico

Un factor ambiental clave del clima mediterráneo, que lo diferencia del clima eurosiberiano, es la sequía estival. Para comprobar el papel de este factor ambiental en la ecología del enebro, se comparó la estructura demográfica del enebro en dos hábitats de Sierra Nevada que difieren en la disponibilidad de agua durante el verano. Se escogió, por un lado, las zonas de ladera de la alta montaña, que es el hábitat donde los enebrales presentan una mayor extensión en Sierra Nevada. En estas laderas, la humedad del suelo depende exclusivamente de la precipitación (lluvia y nieve), por lo que durante el verano el suelo se seca mucho, con valores de humedad por debajo del 8%. Por otro lado, los hábitats de la alta montaña que mantienen una humedad edáfica extra en verano por su proximidad a fuentes, arroyos, borreguiles y acequias de careo (con valores de humedad edáfica superiores al 12%), o por estar a la sombra de rocas y enebros y sabinas adultos. Pues bien, el patrón de diferencias demográficas del enebro encontrado al comparar las dos regiones biogeográficas de la Península, eurosiberiana y mediterránea, aparece también al comparar los dos hábitats de Sierra Nevada: las laderas, donde apenas se ven juveniles, están dominadas por enebros adultos y senescentes. Por el contrario, los enclaves más húmedos, como los bordes de arroyos, de borreguiles y acequias de careo, arrojan porcentajes muy superiores de enebros juveniles¹².

La problemática de regeneración del enebro observada en Sierra Nevada también ocurre en otros lugares de Europa, salvo en Escandinavia y los Alpes, siendo la falta de reclutamiento demográfico, que está causada por la bajísima viabilidad de las semillas, por la ausencia de micrositios adecuados para la regeneración y por la deposición de contaminantes atmosféricos que afectan a la germinación de las semillas, la razón principal del declive poblacional^{53, 54}. La fragmentación y alteración del paisaje en Europa ha generado un patrón de aislamiento geográfico de las poblaciones de enebro, lo que todavía parece que no se ha traducido en un marcado empobrecimiento genético de las mismas⁵⁵. Ello sería indicativo de que las aves dispersantes, al recorrer distancias considerables, dispersan las semillas entre poblaciones separadas geográficamente.

Sin embargo, los niveles moderados de flujo genético derivados de la dispersión de semillas entre poblaciones pueden no ser lo suficientemente altos como para contrarrestar a largo plazo los efectos negativos de la deriva genética y la endogamia en las poblaciones remanentes del enebro común⁵⁵. Esta problemática es mucho más evidente en los enebrales que aparecen en las montañas del sur de España, que tienen una distribución insular y están

además situados en su límite de distribución geográfico. Las investigaciones futuras deberían explorar las tasas de flujo genético efectivas entre poblaciones de enebro situadas en diferentes montañas mediterráneas.

De acuerdo con sus características demográficas, los enebrales mediterráneos montanos son un claro ejemplo de poblaciones con dinámica remanente, que pueden sobrevivir durante largos periodos de tiempo en las actuales condiciones ecológicas desfavorables para la renovación de sus poblaciones⁵⁶. Los enebrales mediterráneos, a modo de fósiles vivientes, conservan una fuerte inercia que retrasa su posible extinción natural, gracias sobre todo a la gran longevidad natural de los enebros, que pueden llegar a ser milenarios^{57, 58}. La persistencia de poblaciones geográficamente periféricas puede jugar un papel clave, como es el caso de los enebrales en las montañas mediterráneas, donde el enebro es una especie paraguas para las comunidades de plantas herbáceas y de invertebrados de alta montaña, muchas de ellas endémicas.

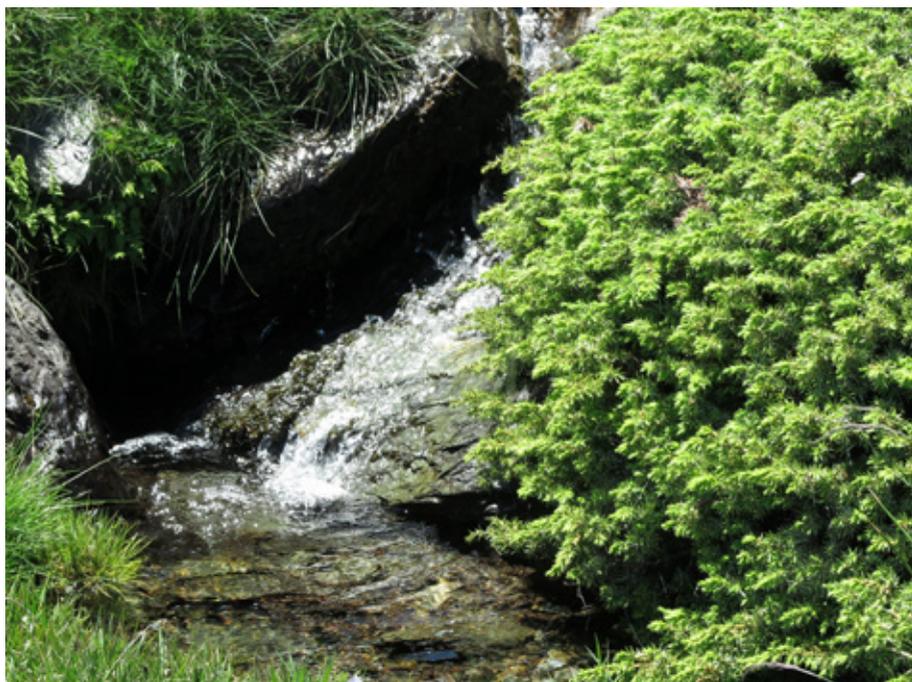


Foto 11. La humedad del suelo durante el verano es un factor clave en la regeneración natural del enebro.



Foto 12. Las aves dispersantes utilizan las grandes rocas como posaderos, lo cual hace que no sea raro que de vez en cuando crezca alguna planta de enebro entre las grietas y fisuras.



Figura 5. El éxito de supervivencia de las plántulas de enebro está muy limitado. Los diferentes estudios realizados han indicado las probabilidades de éxito entre cada una de las fases de la regeneración. Por cada plántula de enebro que ha sobrevivido al primer verano han sido necesarios al menos 1.572 arcéstidas. Los mirlos seleccionan las arcéstidas que mejor aspecto presentan (aquellas que no estén infestadas por *Carulaspis juniperi*). No todas las arcéstidas dispersadas presentan semillas viables. Algunas están abortadas, y otras son consumidas por la avispa *Megastismus bipunctatus*. De las semillas viables, solamente germinan el 25%, y finalmente por no todas las plántulas sobreviven al primer verano.

2.5. SERVICIOS ECOSISTÉMICOS QUE PROPORCIONA EL ENEBRAL

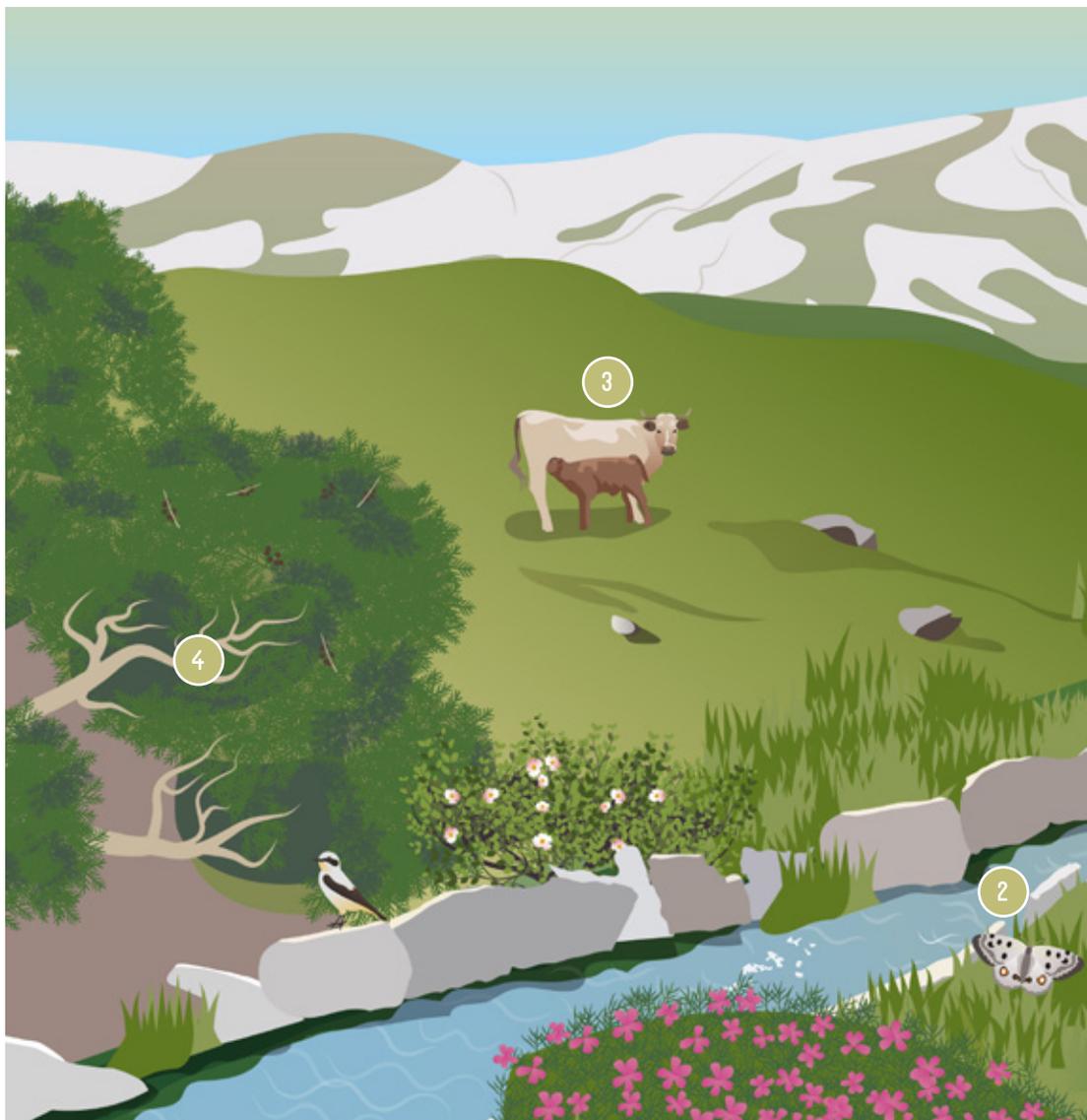


Figura 6. Los matorrales de alta montaña proveen numerosos servicios ecosistémicos. Son el hábitat de aves dispersantes de semillas (1) que propician la propagación de multitud de especies vegetales allí presentes, entre ellas los propios enebros. Igual ocurre en el caso de los insectos polinizadores (2), que presentan un papel primordial en la reproducción de otras muchas especies vegetales. En estos ecosistemas se generan



pastos para el ganado (3) que a su vez también cumplen una importante función vinculada al mantenimiento de la biodiversidad en la alta montaña. El enebro en sí (4) aporta servicios de regulación como la retención de suelo, la fijación de carbono, incremento de la fertilidad del suelo y ejerce como reservorio de biodiversidad. Las acequias tradicionales de careo (5) mejoran las condiciones de los ecosistemas por los que transcurren y les confieren una mayor capacidad de proveer servicios.

Los servicios ecosistémicos principales que proporciona el enebro son: 1) servicios de provisión y abastecimiento, como leña, pasto para el ganado y protección a la biodiversidad de las comunidades de plantas y animales, muchas de ellas endémicas, que usan al enebro como su “casa”. Cuando el enebro se vuelve senescente y muestra un porte más abierto, sirve también de sustrato para el establecimiento de muchas plantas herbáceas de interés ganadero; 2) servicios de regulación, como retención del suelo, fijación de carbono en vegetación (al ser la especie más longeva de la alta montaña, y ser su madera muy resistente a la descomposición), fijación de carbono en suelo, por los grandes aportes de materia orgánica que generan, incremento de la fertilidad del suelo; 3) servicios culturales, como las actividades deportivas de montaña, turismo ecológico, además del valor paisajístico, cultural y científico (Fig. 6).

Podemos observar un patrón temporal en la provisión y demanda de servicios ecosistémicos, condicionado principalmente por los diferentes usos antrópicos a los que han estado sometido los enebrales. Hasta la década de 1970, el suministro de servicios ecosistémicos que predominaba era el de los de abastecimiento y provisión. Aunque los servicios de regulación siempre han estado presentes (p. ej. control de la erosión en algunas zonas escarpadas, por el característico patrón de crecimiento horizontal de esta especie) no existía demanda de ellos y los enebrales eran valorados sólo por los servicios de abastecimiento, como proveedores de leña para el fuego y, sobre todo, pastos para el ganado una vez quemados, entre otros. Poco a poco se fueron abandonando las actividades agrícolas y ganaderas de montaña en el enebro, lo que ha provocado la disminución de la demanda de algunos servicios de abastecimiento frente a un ligero incremento de la demanda de los servicios de regulación (ej. retención de suelo). Posteriormente tras el abandono generalizado de las actividades tradicionales, se produjo una reducción drástica en la demanda de servicios de abastecimiento salvo el pastoreo remanente. Asimismo, debido al incremento de la cobertura de matorral, gracias sobre todo al crecimiento de los pionales, se aumentó la provisión de servicios de regulación (p. ej. retención de suelo, regulación climática y ciclo hidrológico, secuestro de carbono). Por otro lado, fruto de las políticas de protección de los recursos naturales (p. ej. declaración de espacio natural protegido) y de un aumento de la concienciación sobre los valores ambientales que proporciona la naturaleza, se ha producido más recientemente un aumento de la demanda en la provisión de servicios culturales de los enebrales, particularmente por su valor paisajístico, científico y su vinculación a actividades lúdico-deportivas tradicionales de montaña (Fig. 6). En este sentido, sería interesante realizar estudios detallados para proporcionar a los gestores una evaluación completa tanto de la provisión biofísica de servicios ecosistémicos del enebro como de la demanda de los mismos por los usuarios, así como de los posibles impactos de los visitantes en los enebrales nevadenses.



Foto 13. Los enebros y sabinas, debido al gran desarrollo de su sistema radicular y su patrón de crecimiento horizontal, prestan un servicio de retención de suelo que resulta clave en la alta montaña.

RESUMIENDO

1) ¿Qué es lo que le va mal al enebro en Sierra Nevada?

La alta montaña mediterránea impone tres restricciones fundamentales a la capacidad de reproducción y regeneración de los enebros: 1) una limitación en el número de semillas viables, debido al aborto y depredación; 2) una limitación espacial para el reclutamiento, ya que sólo una muy pequeña fracción del hábitat de la alta montaña presenta microhábitats adecuados para la germinación de las semillas y el establecimiento de las plántulas de enebro, debido a la alta mortalidad de

plántulas causada por la sequía estival^{27, 40}, y 3) una limitación temporal, ya que la gran mayoría de los años son demasiado secos para que se produzca reclutamiento, incluso en los mejores lugares. Todos estos factores determinan un colapso de la regeneración natural^{10, 27} en las actuales condiciones climáticas de la montaña mediterránea. A pesar de todo, los enebrales nevadenses sobreviven gracias a la extrema longevidad de los individuos establecidos, que se comportan como fósiles vivientes fuera del ambiente ecológico que permitiría su regeneración poblacional. La estrategia de la persistencia demográfica basada en la longevidad centenaria de los individuos adultos ya establecidos asegura el mantenimiento de las poblaciones durante largos periodos, a la espera de un período climático más húmedo que pueda permitir la regeneración poblacional⁵⁶.



Foto 14. No todos los hábitats de alta montaña son aptos para la germinación de las semillas y el establecimiento de las plántulas de enebro.

2) ¿Qué es lo que todavía le va bien al enebro en Sierra Nevada?

No todo le va mal a los enebrales en la alta montaña de Sierra Nevada. El enebro se beneficia de la interacción mutualista que mantiene con las aves túrdidas que dispersan sus semillas y que seleccionan para su consumo las arcéstidas más sanas (menos infestadas por hemípteros y menos atacadas por la avispa *M. bipunctatus*), y, en consecuencia, con una mayor proporción de semillas viables^{32, 34}. Las aves dispersantes depositan las semillas preferentemente sobre 1) las rocas que las aves utilizan como posaderos, 2) en otros matorrales productores de fruto carnoso (enebros, agracejo, sabina) que facilitan el establecimiento de plántulas de enebro y 3) cerca de las fuentes de agua donde las aves van a beber agua, y son precisamente estos tres microambientes los que aseguran un mayor éxito de germinación y reclutamiento^{10, 27}. No obstante, hemos constatado una drástica disminución en la abundancia del principal dispersor, el mirlo capiblanco, cuya población invernante ha disminuido significativamente en las últimas décadas (Fig. 7), por lo que podemos suponer que la cantidad de semillas dispersadas es ahora mucho menor que antaño.

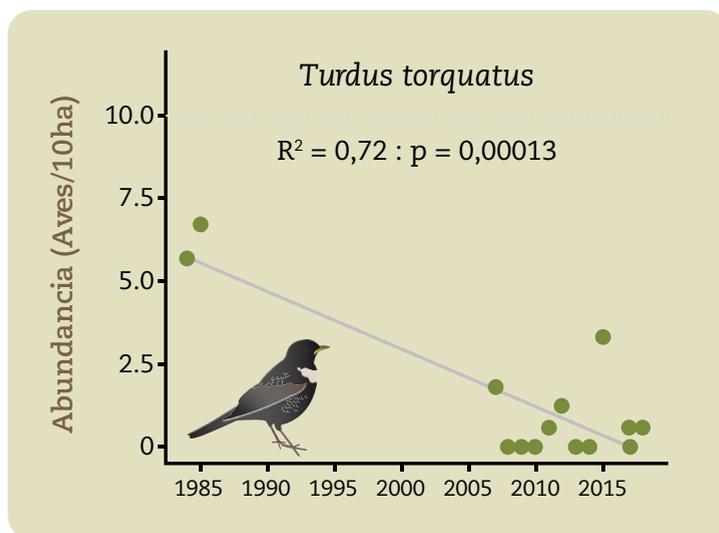


Figura 7. Tendencia poblacional del mirlo capiblanco en Sierra Nevada desde 1984 a 2019.

Al enebro también le beneficia en Sierra Nevada la presencia de otras especies zoócoras (dispersadas por animales) que faciliten su establecimiento, como sabinas y agracejos, creando núcleos formados por varias especies zoócoras que crecen juntas. Estos núcleos multiespecíficos forman islas de fertilidad, gracias a los grandes aportes de materia orgánica de origen vegetal y animal que generan bajo su copa y que cambian significativamente la textura y el contenido de materia orgánica del suelo en los poco desarrollados suelos de la alta montaña. El otro factor que le



viene muy bien al enebro es la existencia de acequias de careo, que le pueden proporcionar la humedad edáfica necesaria para la germinación de semillas y establecimiento de plántulas en las áridas condiciones del verano nevadense. El problema es que en estos sitios que se mantienen húmedos durante el verano se concentra una carga ganadera muy considerable, lo que provoca la mortalidad de plántulas por pisoteo.



Foto 15. El agracejo es una de las especies con las que el enebro comparte hábitats y que facilitan su establecimiento.

SEMPRE SEGUIREI DEL SEGNALAZIONE PASTORE E SEGNALAZIONE ANTIVANDALISTICA DELLE ACQUEDOTTI DI
COSTRUIRE SEGNALAZIONE PER LE ATTIVITA' DEL CANTIERE QUALI SIA IL CASALINO DEL PASTORE
DEL SEGNALAZIONE DI PASTORE SEGNALAZIONE A SEGNALAZIONE DI SEGNALAZIONE

SEGNALAZIONE DI SEGNALAZIONE
SEGNALAZIONE DI SEGNALAZIONE
SEGNALAZIONE DI SEGNALAZIONE

SEGNALAZIONE DI SEGNALAZIONE
SEGNALAZIONE DI SEGNALAZIONE
SEGNALAZIONE DI SEGNALAZIONE

SEGNALAZIONE DI SEGNALAZIONE
SEGNALAZIONE DI SEGNALAZIONE
SEGNALAZIONE DI SEGNALAZIONE

SEGNALAZIONE DI SEGNALAZIONE
SEGNALAZIONE DI SEGNALAZIONE
SEGNALAZIONE DI SEGNALAZIONE

SEGNALAZIONE DI SEGNALAZIONE
SEGNALAZIONE DI SEGNALAZIONE
SEGNALAZIONE DI SEGNALAZIONE

SEGNALAZIONE DI SEGNALAZIONE
SEGNALAZIONE DI SEGNALAZIONE
SEGNALAZIONE DI SEGNALAZIONE

SEGNALAZIONE DI SEGNALAZIONE
SEGNALAZIONE DI SEGNALAZIONE
SEGNALAZIONE DI SEGNALAZIONE



03

**EL ENEBRAL EN EL ANTROPOCENO:
IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO
Y DE LOS CAMBIOS DE USO DEL
TERRITORIO.**

3.1. CAMBIO CLIMÁTICO Y MIGRACIÓN ALTITUDINAL

Los ecosistemas de montaña están experimentando alteraciones importantes derivadas del cambio climático global⁵⁹. De hecho, se prevé que las montañas sufran un calentamiento climático más acusado y rápido que otros ecosistemas situados a menor altitud. Esta tendencia se agrava en el Mediterráneo⁶⁰, especialmente en las áreas montañosas^{60,61}. Por ello, las altas montañas mediterráneas están entre los ecosistemas más vulnerables al calentamiento global^{59,62}.

Tanto la dinámica poblacional como las respuestas ecofisiológicas de las especies leñosas en el límite altitudinal de su distribución en las montañas están fuertemente determinadas por la temperatura⁶³. Por tanto, es lógico esperar cambios en el crecimiento, en la tasa reproductiva o en el reclutamiento del enebro ante el calentamiento global. De hecho, la estructura demográfica de las poblaciones de enebro difiere a lo largo de su distribución altitudinal en Sierra Nevada²⁶. Las poblaciones situadas en las cotas altitudinales más bajas presentan una estructura de edad más avanzada, en comparación con las poblaciones situadas en el límite altitudinal superior, donde tienen una estructura de edad más joven y hay una mayor proporción de enebros juveniles²⁶.

A tenor de lo comentado anteriormente, el comportamiento de las poblaciones de enebro para las próximas décadas podría ser claramente distinto a lo largo del gradiente altitudinal de Sierra Nevada. En el límite altitudinal superior podemos esperar una fase inicial de expansión poblacional en respuesta al aumento de las temperaturas, seguida de una fase de estabilización una vez alcanzadas las condiciones óptimas de la especie⁶⁴. Al contrario, en el límite altitudinal inferior cabría esperar una primera fase de resiliencia en la que se mantienen las poblaciones relativamente estables debido a la longevidad de los enebros ya establecidos pese a que las condiciones ya no son óptimas, seguida de una fase de rápido declive poblacional una vez que se superan los límites para la supervivencia de los individuos, pudiendo producirse eventos de mortalidad masiva.

Por último, podría aparecer una tercera fase en la que la especie queda relegada a poblaciones relictas en aquellos lugares donde las condiciones topográficas y microclimáticas locales permiten su persistencia. Sin embargo, es necesario tener en cuenta otra serie de factores, como la topografía y heterogeneidad espacial, el incremento en la sequía estival, la disminución de cobertura de nieve, o el mantenimiento o ruptura de las interacciones bióticas (mutualismos de dispersión de semillas o interacciones de facilitación planta-planta) que

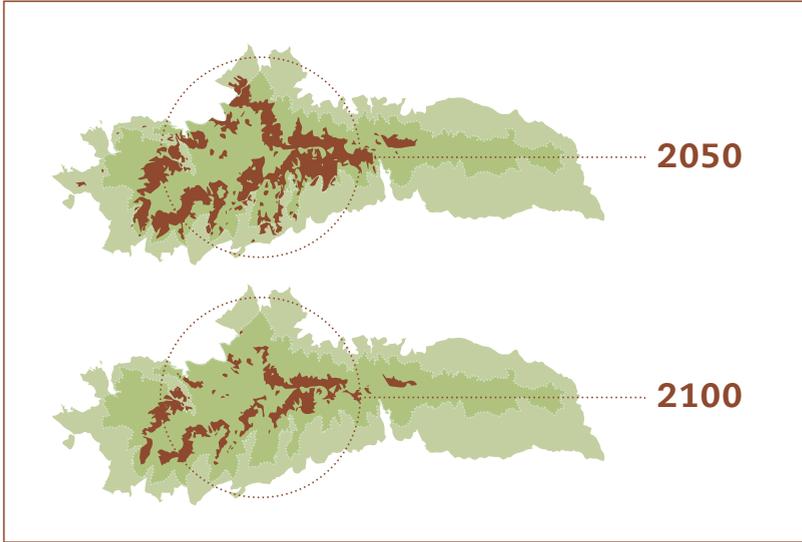
podieran amortiguar o potenciar los efectos puramente climáticos sobre los límites altitudinales de distribución superior e inferior del enebro en Sierra Nevada. Por ejemplo, puede ocurrir que los enebros que están colonizando el límite altitudinal superior sean escasos y estén además más dispersos. Además, su capacidad reproductiva y vegetativa debe de estar muy limitada por el estrés ambiental. En estas condiciones, cabe esperar que los enebros inviertan poco en reproducción, por lo que la cosecha de arcéstidas será muy escasa en las cotas más altas. Si apenas hay arcéstidas, no ascenderán altitudinalmente las aves dispersantes que buscan siempre los lugares en la montaña con la mayor cantidad y diversidad de frutos (entre 1.600 y 2.200 m), colapsando en estas circunstancias la regeneración del enebro en las cotas más altas por falta de dispersantes.

En cualquier caso, las proyecciones a futuro simulando un aumento de temperatura promedio de 4,8°C a fines del siglo XXI sugieren un desplazamiento vertical ascendente de los hábitats adecuados para muchas especies de plantas de Sierra Nevada, incluyendo al enebro, a una tasa de 11,57 m/10 años⁶⁵. Esta tasa es mucho más alta que los patrones observados de movimiento real para las especies alpinas, por ejemplo, 1-4 m por década en los Alpes⁶², o 2,9 m para las montañas europeas⁵⁹. Es previsible que este ritmo provoque la extinción local de una parte importante de las especies que migran altitudinalmente^{14, 66}. Específicamente, las proyecciones del modelo sugieren una pérdida completa de las condiciones adecuadas actuales en todos los escenarios de calentamiento para el enebro (Fig. 8).

Estos resultados no necesariamente significan la extinción del enebro en Sierra Nevada, sino la desaparición del nicho térmico que habitan actualmente. Lo que sí parece previsible es que se acentúe el declive de los enebrales, y que las grandes extensiones de enebro todavía existentes queden cada vez más reducidas y acantonadas a los enclaves de la alta montaña protegidos por las rocas y/o que proporcionan un extra de humedad edáfica próximos a arroyos, borreguiles y bordes de acequias. De ahí la enorme responsabilidad que tenemos de conservar los enebrales todavía existentes.

3. EL ENEBRAL EN EL ANTROPOCENO:
IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y DE LOS CAMBIOS DE USO DEL TERRITORIO.

ESCENARIO 1



ESCENARIO 2

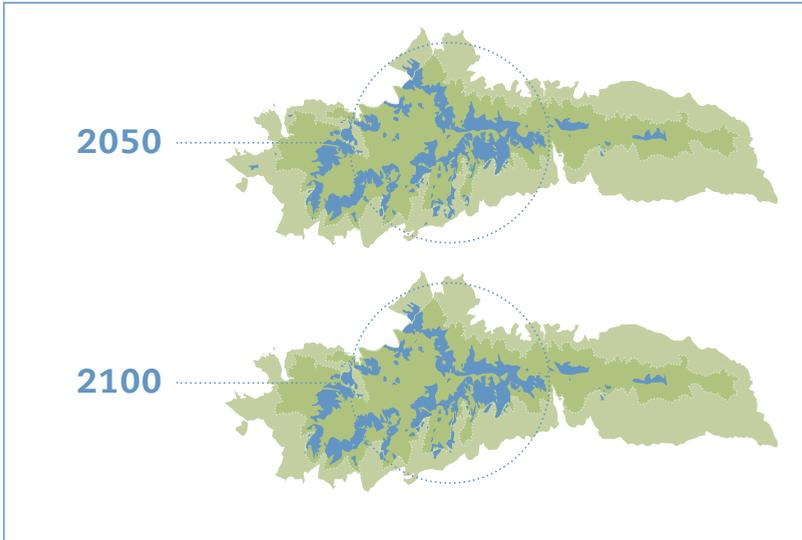


Figura 8. Distribución potencial del enebro proyectada para el futuro y evolución temporal de la superficie de su hábitat potencial de aquí a finales de siglo según diferentes escenarios climáticos del IPCC. (escenario 1: a2 y escenario 2: b2^{SS})

3.2. PERTURBACIONES DE ORIGEN ANTRÓPICO EN LOS ENEBRALES

Los enebros adultos (pero no sus plántulas) muestran una gran resistencia frente a los factores abióticos (sequía estival, bajas temperaturas invernales, peso de la nieve) y al ramoneo y pisoteo de los herbívoros, todos ellos factores naturales que sí afectan muy significativamente a otras especies leñosas de la montaña mediterránea. Sin embargo, el enebro tiene una capacidad muy limitada para recuperarse de las perturbaciones humanas, como los incendios provocados para conseguir más pastos para el ganado y los desmontes para abrir pistas de esquí y carriles.

Los enebrales han estado sometidos secularmente en Sierra Nevada a perturbaciones antrópicas que han ocasionado una regresión en su área de distribución antes de la declaración del espacio protegido de Sierra Nevada¹². Los matorrales y pastizales de la alta montaña de Sierra Nevada han sido tradicionalmente usados como pastos de verano para el ganado doméstico. El manejo tradicional de los pastores consistió en quemar los enebrales para obtener pastizales de *Festuca* spp. Normalmente el enebro era quemado en el otoño, cuando el ganado abandona los pastos de verano. La baja capacidad de reclutamiento del enebro y la sabina en condiciones mediterráneas¹² ha provocado una reducción paulatina del área ocupada por estas especies, reemplazadas por otras plantas mediterráneas mejor adaptadas al fuego¹¹, muy particularmente por piornales. Este manejo, asociado con la pérdida de suelo, puede haber causado la prevalencia actual de las comunidades de *Festuca* spp. y matorrales de tomillo en la alta montaña de Sierra Nevada. Dado que la quema de los enebrales fue prohibida a principios de los años ochenta, hoy en día todavía es posible observar rodales de enebros y sabinas de cierta extensión, usualmente acantonados en sectores rocosos, y rodeados de amplias superficies ocupadas por el piornal y los pastizales que colonizaron buena parte de las zonas quemadas.

Las perturbaciones asociadas a la construcción de pistas de esquí y carriles en Sierra Nevada destruyen la capa superficial del suelo y eliminan el banco de semillas y la materia orgánica. Además, suprimen los bloques de piedra que sirven de posadero a las aves encargadas de dispersar las semillas y que actúan como focos de recolonización, pues allí se concentran los excrementos con las semillas. Sin embargo, son extremadamente bajas las posibilidades de que las semillas colonicen las zonas abiertas que han generado estas perturbaciones, pues las aves no visitan estas zonas abiertas y la supervivencia de las plántulas en los claros expuestos al sol es casi nula^{12, 27}. Estas alteraciones han provocado

una considerable reducción y fragmentación de la cubierta original del enebro en Sierra Nevada, agravando sus problemas de regeneración.



Foto 16. El ganado doméstico puede representar una limitación adicional para la regeneración del enebro, es por ello que es muy importante el papel de algunas especies vegetales espinosas o poco palatables, en el interior de las cuales el enebro juvenil tiene protección frente al pisoteo y ramoneo.

3.3. ENSEÑANZAS DEL PROCESO DE RESTAURACIÓN NATURAL

Desde una perspectiva aplicada, es fundamental diagnosticar el potencial de recuperación natural del enebro en la alta montaña de Sierra Nevada. Para comprobar si este potencial se traduce en una regeneración real, se estudiaron dos zonas que habían sufrido perturbaciones antrópicas, una por incendio y otra por la apertura de una pista de esquí.

Después de un incendio, el enebro es incapaz de rebrotar y la mayoría de sus semillas mueren, de manera que la única forma de volver a colonizar los espa-

cios abiertos que ha generado el fuego es a través de las semillas procedentes de áreas circundantes no quemadas. Tras el incendio, el suelo calcinado queda expuesto a una eventual erosión eólica y/o de escorrentía. Para estudiar el potencial colonizador del enebro tras el incendio, se eligió una parcela en la Loma del San Juan (2.200 m), en una ladera cubierta por un matorral de enebros que fue quemado parcialmente en 1983.

La parcela elegida para estudiar la recolonización de una pista de esquí abandonada estaba ubicada en Campos de Otero, entre los 2.200 y los 2.550 m. La zona había sido preparada para su uso como pista de esquí en 1978, instalando un telesquí de 900 m de largo y 35 m de ancho que apenas entró en funcionamiento. Tras las dos perturbaciones (el incendio y la apertura de la pista de esquí) no se produjo ninguna otra intervención humana, aparte del pastoreo del ganado. Por tanto, se puede considerar que el proceso de recolonización de la vegetación tanto en la zona quemada como en la pista de esquí abandonada ha seguido una dinámica natural.

Para recolectar datos sobre la recolonización del enebral en las dos zonas que habían sufrido perturbaciones por fuego o por la construcción de la pista de esquí, se realizaron transectos dentro del área perturbada, además de en el enebral no perturbado adyacente que se usó como control. Se establecieron 10 transectos de 50 x 2 m (100 m²) distribuidos equitativamente en el área quemada/pista de esquí y 10 transectos similares en el matorral de enebros no perturbado cercano. En los transectos se cuantificó la cobertura de los enebros y otras especies arbustivas, además de la abundancia y tamaño de los enebros. Los transectos se llevaron a cabo a principios de los veranos de 1995 y de 2021.

Tras el largo tiempo transcurrido desde la construcción y posterior abandono de la pista de esquí (más de 40 años), apenas se encuentran enebros en la actualidad, a pesar de que la pista atraviesa la mayor población de enebros de Sierra Nevada. La cobertura de enebro es ahora del 3% en la pista de esquí, y todos los enebros encontrados son juveniles o adultos pequeños, mientras que en el estudio anterior realizado en 1995 no se encontraron enebros. Por el contrario, la cobertura de piornos ha aumentado notablemente desde 1995 en la pista de esquí, por lo que una buena parte del suelo desnudo en 1995 está ahora cubierto por piornos, aunque sigue habiendo una proporción importante de suelo desnudo (Fig. 9b). Por otra parte, la cobertura de piornos en la zona quemada ha aumentado del 15% en 1995 al 73% en la actualidad, mientras que la cobertura de enebro ha pasado del 0% a sólo el 6% (Fig. 9a). Por tanto, un enebral quemado se convierte tras varias décadas en un piornal denso con una cobertura próxima al 100% y donde apenas hay enebros.

3. EL ENEBRAL EN EL ANTROPOCENO:
IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y DE LOS CAMBIOS DE USO DEL TERRITORIO.

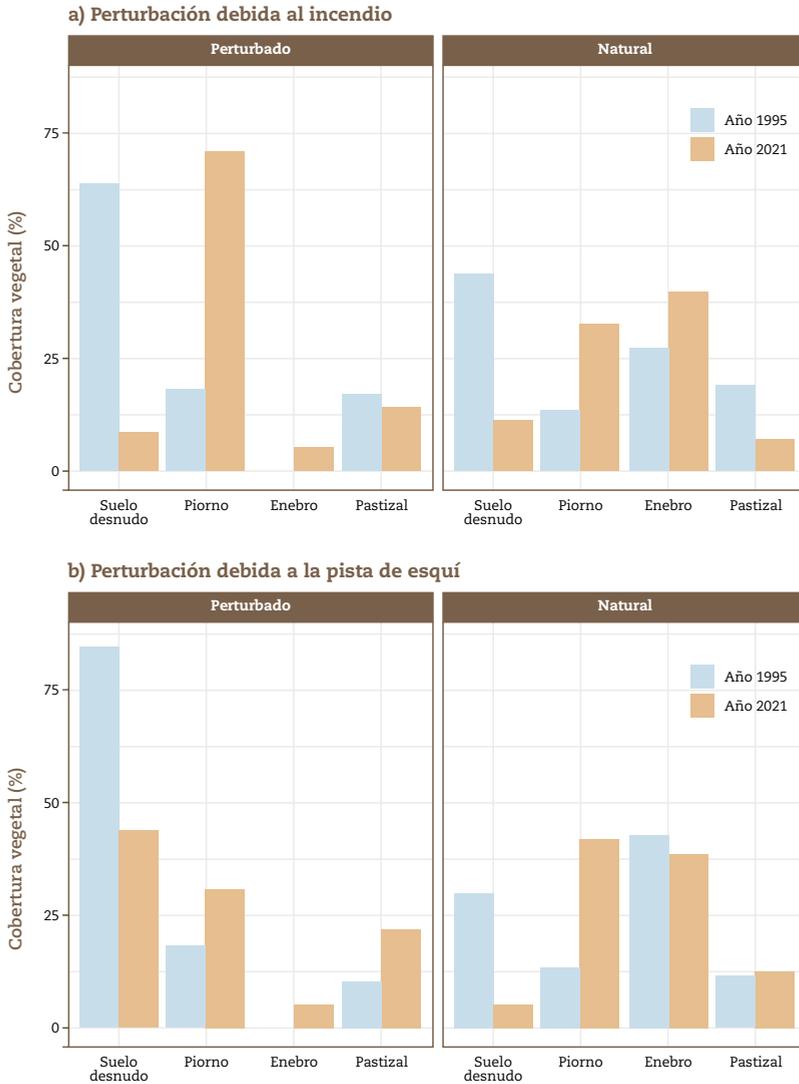


Figura 9. Evolución temporal del enebro y del piornal en una zona incendiada y en otra afectada por la instalación de una pista de esquí.

Con respecto a los cambios observados en el sector de enebro no alterado próximo a la pista de esquí, se observa que la cobertura de enebro permanece estable o incluso aumenta (Fig. 9), aunque esto ocurre gracias al crecimiento de los individuos ya establecidos, no al establecimiento de nuevos enebros en

la población. De hecho, en 1995, los juveniles representaban el 10% de los individuos de la población⁶⁷ en estos sectores inalterados del enebro, mientras que en 2021 prácticamente no se encontraron juveniles. Esta limitación en el reclutamiento del enebro se corresponde con el muy bajo éxito de germinación y establecimiento de plántulas encontrado en los experimentos de siembra que se describen a continuación. En definitiva, la regeneración del enebro de Sierra Nevada ha empeorado incluso en los sectores del enebro mejor conservados y que no han sufrido ninguna perturbación. Por el contrario, el piorno ha aumentado constantemente su cobertura desde 1995 hasta la actualidad, colonizando el 35% de la superficie ocupada por el enebro no alterado, el 73% de la zona quemada y el 30% de la pista de esquí abandonada (ver Fig. 9). En definitiva, tanto en los sectores alterados de la alta montaña por quemas y desmontes como en los sectores de enebro mejor conservados se observa el mismo proceso de matorralización que beneficia al piorno frente al enebro.

Recientemente, el análisis de ortofotos realizadas entre 1977 y 2020 (procesadas a través de teledetección manual), ha permitido identificar cambios en la tasa de crecimiento de los enebros y sabinas de la alta montaña de Sierra Nevada⁶⁸. En este trabajo se digitalizó el área y perímetro de 600 individuos de enebro y sabelina en seis zonas (desde los 1.900 m hasta los 3.000 m) de la alta montaña de Sierra Nevada. Los resultados muestran que, durante las últimas décadas, los enebros situados en zonas que han sido alteradas por el hombre en el pasado (paratas o terrazas de cultivo y pastizales abandonados, carriles y pistas de esquí, etc) han crecido más que los enebros situados en las manchas de enebro no alteradas. Los resultados también indican que los enebros que crecen asociados con otros matorrales de montaña (sabinas, agracejos y piornos) experimentaron mayor crecimiento que los que crecen aislados, rodeados de suelo desnudo o canchal. Por otra parte, los enebros que aparecen a mayores altitudes presentaron más daños en su follaje y una menor tasa de crecimiento que los enebros que crecen a menores altitudes, que tienen un aspecto más saludable. Estos resultados concuerdan con la información de campo aportada en la figura 9, donde también se aprecia en las últimas décadas el crecimiento de los enebros ya establecidos, tanto en los sectores perturbados como en los no alterados, aunque es el piorno el que ha incrementado su cobertura de forma masiva. El cambio de uso del suelo en Sierra Nevada, derivado de las figuras de protección del Parque Nacional y Natural, ha supuesto un beneficio para la conservación del enebro, al limitar ciertas prácticas tradicionales en la alta montaña. Las medidas de protección han favorecido la supervivencia y el crecimiento de los enebros establecidos hace décadas o cientos de años. Por contra, el incremento de aridez asociado al cambio climático dificulta cada vez más la regeneración poblacional del enebro en Sierra Nevada.



The background features a large, light blue circle on the left side, partially overlapping a white area. Above this, there's a brown, scalloped-edged shape. The top right corner is a solid brown color. On the far left, a small portion of a mountain landscape with snow and greenery is visible.

04

EXPERIENCIAS EN EL MARCO
DE LIFE ADAPTAMED

4.1. SI LA REGENERACIÓN NATURAL ES MUY LENTA, ¿PODEMOS AYUDAR A ACELERAR EL PROCESO?

Para restaurar el enebro en la alta montaña de Sierra Nevada hay que identificar los microhábitats más adecuados para la siembra de semillas y/o plantación. En el marco del cambio climático actual, con una sequía estival cada vez más acusada, el enebro tiene un problema muy serio de regeneración natural en Sierra Nevada, debido a limitaciones reproductivas y demográficas. El impacto humano en la montaña (quemadas, desmontes) ha provocado una disminución sustancial del área antaño ocupada por los enebrales montanos. La población de enebros apenas se regenera donde los adultos están ya establecidos (laderas de alta montaña), por lo que los enebros que mueren no son sustituidos por otros enebros. El nicho de regeneración del enebro en la montaña mediterránea se corresponde ahora con los microhábitats que retienen una humedad edáfica extra durante el verano, como los bordes de los borreguiles, los arroyos y acequias de montaña o bajo las grandes rocas.

El objetivo planteado en el marco del proyecto Life Adaptamed es la recuperación de los enebrales de alta montaña. Las actuaciones de restauración planificadas están basadas en el conocimiento de la regeneración natural del enebro en la alta montaña (soluciones basadas en la naturaleza) y en los usos tradicionales, utilizando las acequias de careo para consolidar y expandir las poblaciones de enebro en la alta montaña. Paradójicamente, una construcción humana con fines agroganaderos, como son las acequias de careo, proporcionan la humedad indispensable para regenerar el enebro y favorecer su reintroducción en zonas de la alta montaña mediterránea antaño ocupadas por enebrales.

Hemos realizado siembras de semillas y plantaciones en sectores de la alta montaña de Sierra Nevada susceptibles de recuperar el enebro, tanto en cara norte como en la cara sur. Se trata de áreas que antaño estaban ocupadas por enebrales (zonas quemadas, antiguas paratas de cultivos de montaña abandonados), por lo que son susceptibles de restauración, ya que las condiciones ecológicas son muy similares (e.g. exposición, altitud, tipo de suelo) a la de las manchas de enebro que se encuentran en la inmediata proximidad.

4.2. EXPERIMENTO DE SIEMBRAS

En la cara sur, donde ya no existen formaciones de enebral, aunque sí quedan enebros dispersos, se han realizado sólo siembras de semillas, para determinar si el actual colapso en la regeneración del enebral en la vertiente sur se debe fundamentalmente a un problema de limitación en la llegada de semillas, como consecuencia del muy escaso número de enebros adultos presentes. Es decir, en la vertiente sur de Sierra Nevada, nuestra hipótesis es que el primer factor limitante en la regeneración del enebral es la limitación en el número de semillas dispersadas, porque apenas hay enebros adultos, y en consecuencia, aves dispersoras. Si no hay semillas para la dispersión, el resto de etapas del ciclo de regeneración quedan bloqueadas automáticamente. En la vertiente norte, donde todavía hay extensiones de enebral bien conservadas, consideramos que la limitación en la regeneración no se debe tanto a la producción y dispersión de semillas (que sí ocurre), sino a la germinación y sobre todo al establecimiento de las plántulas en las actuales condiciones climáticas. Consideramos que esta limitación al reclutamiento debe de ocurrir con más fuerza en la vertiente sur que en la vertiente norte por la mayor insolación, pero que en condiciones naturales no llega a ocurrir, sencillamente porque el reclutamiento se bloquea antes por falta de semillas. En base a las hipótesis planteadas anteriormente sobre el principal factor que limita el reclutamiento, en la cara sur sólo se han realizado siembras, mientras que en la cara norte, se han realizado siembras y plantaciones.

Como parte del trabajo de campo realizado en el marco del proyecto Life Adaptamed se han establecido 3 réplicas en cada parcela de siembra/plantación en cara norte y otras 2 réplicas en la parcela de la cara sur, localizadas en la misma cota altitudinal (2.160 m en la cara norte, y 2.500 m en cara sur), a unos 100-300 m unas de otras. Las siembras y plantaciones se han realizado en los siguientes microambientes (Fig. 10): 1) bajo enebro (bajo el dosel de enebro adulto, solo en la cara norte) 2) bajo piorno (bajo el dosel de piorno)(estos dos primeros microambientes solamente se incluyeron en la vertiente norte), 3) bajo roca (a la sombra de rocas), 4) prados húmedos, junto a cursos de agua (fuentes, borreguiles, acequias), y 5) pastizal (espacios abiertos entre vegetación leñosa). Los puntos de siembra (10 en cada microambiente) consistieron en cuadrados de 20x30x5 cm, protegidos contra depredadores de semillas con malla galvanizada de 1 cm de luz. Se establecieron 150 puntos de siembra en cara norte (10 puntos de siembra x 5 microambientes x 3 réplicas) y 60 en cara sur (10 puntos de siembra x 3 microambientes x 2 réplicas). En cada cuadrado se han sembrado

15 semillas de enebro y 15 semillas de agracejo, que es una especie que acompaña al enebro en Sierra Nevada. Además, dado que las semillas de enebro tardan casi dos años en germinar, la siembra de semillas de agracejo (que sólo necesita un año para germinar) nos podría permitir obtener una mayor serie temporal de datos de germinación, emergencia y supervivencia de plántulas del matorral de la alta montaña.

En la cara norte, las siembras se realizaron en dos períodos diferentes (1996-1998 y 2017-2020), y se analizó la germinación y supervivencia de las semillas durante varios años con posterioridad a la siembra. El último período (2017-2020) corresponde a los trabajos realizados dentro del proyecto Life Adaptamed. Las siembras anteriores realizadas en los años 1996-1998 corresponden a los trabajos de investigación realizados por el Grupo de Ecología Terrestre de la Universidad de Granada en el marco de la Tesis Doctoral de Daniel García^{20, 27, 29}. En 1996-1998 las semillas se sembraron en 4 microambientes (ver²⁷): bajo enebro; bajo roca; pastizal y junto a cursos de agua. La supervivencia de las plántulas se analizó cada año después del verano. Los microambientes donde el enebro tiene el mayor éxito de reclutamiento son los prados húmedos junto a cursos de agua y bajo las rocas.

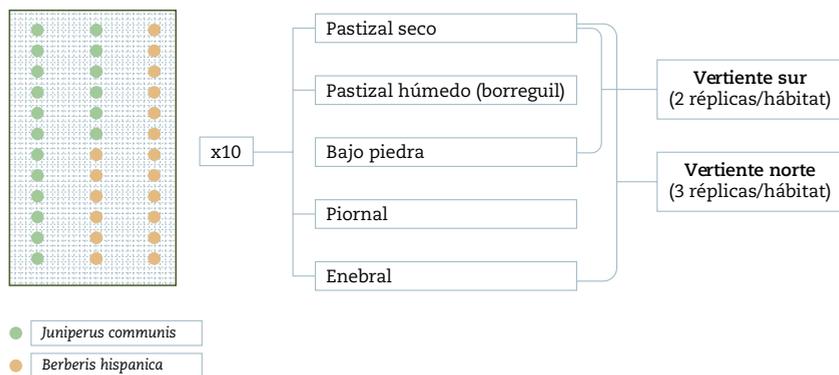


Figura 10. Esquema seguido en las siembras de semillas de enebro y agracejo en la vertiente norte y en la vertiente sur.

Los datos muestran marcadas diferencias en la germinación de semillas y la supervivencia de plántulas entre los dos períodos comparados (Fig. 11), disminuyendo ambas considerablemente en 2017-2020 respecto a 1996-1998. Consideramos que esto se debió a la diferente climatología de los años en que se realizaron las siembras: años lluviosos en los años 1996, 1997 y 1998, con más

de 835 mm de precipitación por año²⁷ y años secos en los años 2018, 2019, 2020, con alrededor de 410 mm de precipitación por año (frente a una precipitación acumulada promedio de 577 mm de 1941 a 2019 (<http://climanevada.obsnev.es>) Estos resultados señalan claramente la importancia del clima como modulador de la capacidad de regeneración del enebro. De hecho, la mayor aridez de los últimos años ha colapsado el reclutamiento, lo que se manifiesta también en la actual estructura demográfica del enebral, donde apenas hay juveniles. Con los datos obtenidos en la siembra realizada en los años “lluviosos” (1996-1998) podemos afirmar que los lugares de la alta montaña donde el enebro tiene el mayor éxito de reclutamiento son los enclaves comparativamente más húmedos (cerca de arroyos permanentes y acequias de careo) y las rocas (bajo la sombra de las rocas), mientras que en los pastizales y zonas abiertas no hay reclutamiento. Las siembras realizadas en los años 2018, 2019, 2020, que resultaron mucho más secos que los años 1996-1998, ofrecen resultados muy similares en cuanto a la calidad diferencial de los microambientes para la germinación de semillas y la supervivencia de plántulas.

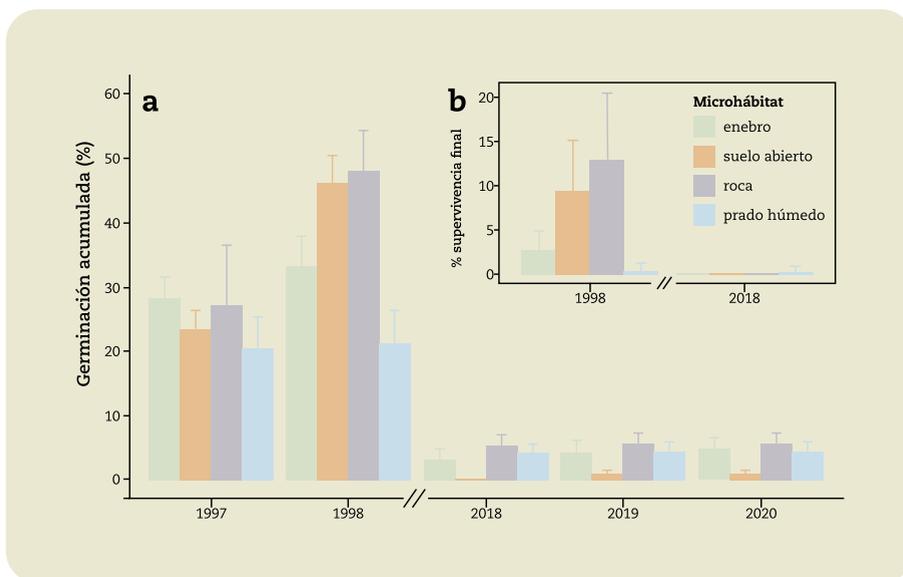


Figura 11. Comparativa de la germinación acumulada (a) y supervivencia final de plántulas (b) en dos períodos de tiempo: 1996-1998 y 2018-2020.



Foto 17. Plántula de enebro procedente de una siembra realizada en el marco del proyecto Life Adaptamed.

4.3. EXPERIMENTO DE PLANTACIÓN

Como parte del trabajo de campo realizado en el marco del proyecto Life Adaptamed se han realizado también plantaciones de 3-6 savias de enebro ($n= 109$), sabina ($n= 130$) y agracejo ($n= 126$). La plantación se realizó aprovechando los hoyos que ya estaban hechos en una parcela cercada situada a 2.260 m en una zona del enebreal de la Loma del San Juan que se quemó en el año 1983, y donde ha crecido un piornal con una cobertura considerable (Fig. 12). Dicha parcela se cercó en el año 2008, dejando los hoyos de plantación hechos y preparados para una plantación que no llegó a hacerse. Aprovechando estas actuaciones previas, nosotros realizamos nuestra plantación en octubre de 2020, tras las primeras lluvias otoñales. Los plantones provenían de semillas colectadas por nosotros mismos en las zonas de actuación. Estas semillas fueron recolectadas de excrementos de mirlo capiblanco (minimizando las probabilidades de semillas dañadas³²), preparadas y germinadas en el vivero de La Resinera. La planta fue posteriormente madurada durante un año en el Jardín Botánico Hoya de

Pedraza (1.900 m), muy cerca de la zona de la plantación. En función de la disponibilidad de plántones y del tamaño del hoyo de la plantación, en cada banqueta se plantaron: 1) un plánton de enebro y otro de agracejo, 2) uno de sabina y otro de agracejo, 3) un plánton de enebro y otro de sabina. De esta manera podríamos comparar la supervivencia y crecimiento de los plántones de especies diferentes en el mismo punto de plantación. Por otra parte, este esquema de plantación reproduce una situación natural, ya que enebros, sabinas y agracejos suelen crecer juntos, pues son dispersadas por las mismas aves, y es frecuente que semillas de varias especies diferentes sean depositadas juntas.



Foto 18. Bandejas forestales con los enebros plantados en el marco del proyecto Life Adaptamed.

Una vez plantados los plántones, se cubrió el suelo de la banqueta con piedras para mejorar la retención de humedad. Los plántones fueron debidamente numerados y etiquetados individualmente para su posterior seguimiento. Consideramos que las condiciones de plantación eran idóneas por la exposición norte de la ladera, y sobre todo por aprovechar los hoyos de plantación, cuyo tamaño aseguraba una buena retención de agua. La cobertura de piornos existente permitía también un sombreado moderado durante el verano.



Foto 19. Los voluntarios que realizaron la plantación.

La plantación fue realizada por voluntarios en un proceso de participación ciudadana con el valor añadido de la actividad de educación ambiental. En total, cuarenta voluntarios recibieron la formación necesaria para acometer la tarea, transportaron la planta desde la zona a donde pudieron acceder los todoterrenos a la zona de plantación y fueron organizados en grupos de dos personas para realizar el ahoyado, preparar el terreno y plantar las plantas.



Foto 20. Ahoyado y preparación del terreno para la plantación.

Esta actividad se realizó de forma coordinada con la empresa Huerto Alegre SL, quienes proveyeron las herramientas y organizaron la asistencia de voluntarios a través de un programa enmarcado en la acción E4 del proyecto Life Adapta-med.

Hasta el momento se han realizado dos revisiones de la plantación, una en la primavera de 2021, para comprobar mortalidad invernal, y otra a final de verano del 2021, para cuantificar mortalidad estival.

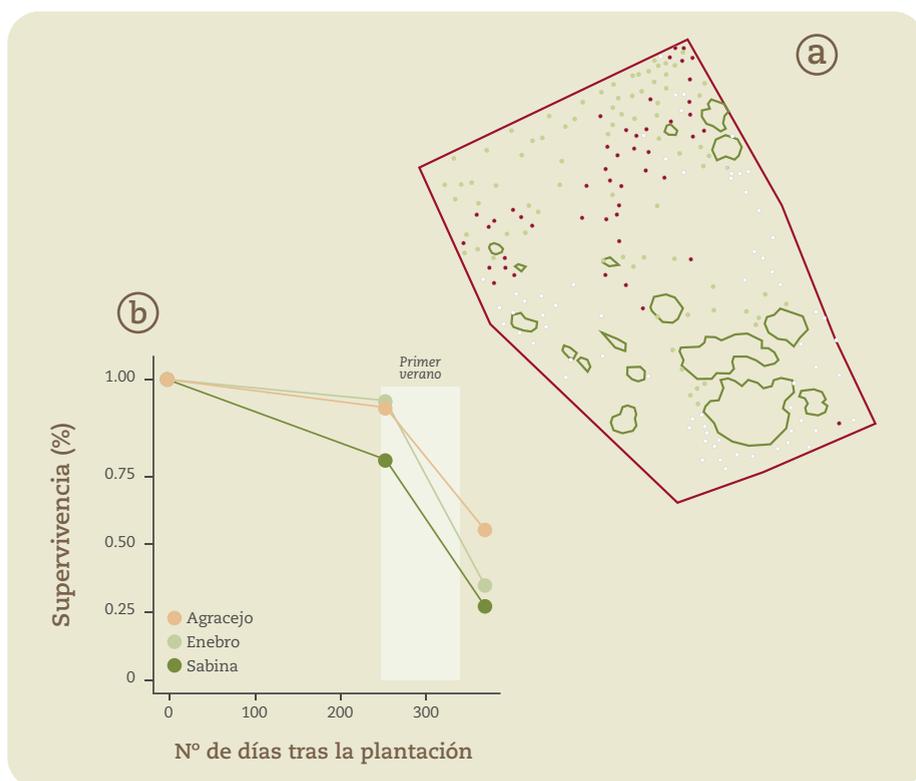


Figura 12. Diseño de la plantación (puntos blancos: enebro+sabina, puntos verdes enebro+agracejo, puntos rojos: sabina+agracejo, línea roja: delimitación de la parcela y líneas verdes: ejemplares de enebro)(a) y resultados de supervivencia para el primer año (porcentaje inicial de plantones de enebro, sabina y agracejo plantados en otoño 2020, supervivientes a final de la primavera siguiente y a comienzos del otoño siguiente)(b).

La plantación al cabo de un año ofrece resultados esperanzadores, ya que casi la mitad de los plantones han sobrevivido en un año (2020) que podemos calificar de seco (precipitación claramente por debajo de la media).

4.4. LECCIONES APRENDIDAS EN LAS ACTUACIONES DEL PROYECTO LIFE ADAPTAMED Y RECOMENDACIONES DE GESTIÓN

La sequía estival que caracteriza al clima mediterráneo dificulta mucho la restauración activa del enebro. Todo proyecto de este tipo debe tener en cuenta que, si bien la viabilidad de las semillas en las poblaciones naturales es muy baja y las plántulas son muy sensibles a la sequía estival, su capacidad de supervivencia aumenta considerablemente cuando superan el cuello de botella de los primeros años de vida. Por tanto, dada la incertidumbre climática (no sabemos si el año de la restauración y los siguientes van a ser muy secos, normales o vamos tener el milagro de algún año lluvioso), recomendamos que las repoblaciones se hagan tanto con semilla, lo que nos permite realizar un número considerable de siembras en un abanico más amplio de microhábitats sin necesidad de preparación previa del terreno, como con plantones, que tienen un mayor éxito de supervivencia que las siembras, pero que son mucho más costosos de obtener. En este último caso las repoblaciones deberían hacerse con plantones ya desarrollados y con el tallo bien lignificado, por lo que un cuello de botella importante es obtener un número adecuado de plantones en vivero.

Si la siembra se hace en un año excepcionalmente lluvioso, el éxito de germinación y de establecimiento de plántulas obtenido sería importante, alrededor del 40% de las semillas sembradas de acuerdo a los resultados obtenidos en los años 90²⁷. Por el contrario, si el año es seco o muy seco (como es cada vez más habitual), el éxito de germinación y de supervivencia de plántulas será muy bajo o nulo. En estas mismas condiciones climáticas “secas”, la plantación de plantones en lugares adecuados y con una banqueta que acumule el agua funciona mejor que la siembra de semillas. La plantación debe hacerse en otoño, tras las primeras lluvias y antes de que el suelo empiece a helarse. Los plantones deben transportarse con cepellón para plantarlos en los microhábitats de alta montaña donde la probabilidad de supervivencia sea mayor, particularmente los situados en la base de bloques de roca y en la proximidad de los cursos de agua. No recomendamos la plantación en primavera, porque la transición del invierno al verano es muy rápida en la alta montaña y el suelo se seca muy pronto, por lo que a los plantones no les da tiempo de desarrollar su sistema radicular y se mueren. Por el contrario, la siembra de semillas puede hacerse en primavera o en otoño, aunque si la hacemos en otoño reproducimos la fenología natural de dispersión de semillas.

Las antiguas acequias de montaña pueden desempeñar un papel importante como vías de repoblación de los enebrales, creando un mosaico de “ventanas de regeneración” en las laderas. No obstante, habría que regular la presión ganadera durante varios años en las zonas repobladas a lo largo de las acequias de careo. Un exceso de ganado provoca una mortalidad masiva de plántulas por pisoteo. Por el contrario, una exclusión absoluta de los herbívoros mediante cercados favorece un crecimiento excesivo del pastizal muy especialmente en los sectores más húmedos, lo que podría excluir competitivamente a los plantones de enebro.

Una vez realizada la siembra o plantación, es imprescindible hacer un seguimiento periódico para determinar las causas de mortalidad de los plantones, especialmente aquellas que sí pueden controlarse como, por ejemplo, la presión ganadera o la gestión de las acequias de careo, que puedan ser compatibles con una regeneración adecuada de las poblaciones de enebro.



Foto 21. Señalización en la zona de actuación.



Foto 22. Plántulas de enebro y agracejo plantadas en el marco del proyecto Life Adaptamed.





05

ENSEÑANZAS PARA
LA CONSERVACION Y
RESTAURACION

5.1. RESTAURACIÓN DE ZONAS DEGRADADAS (INCENDIOS, CARRILES Y PISTAS DE ESQUÍ)

Si la regeneración natural del matorral de la alta montaña en los sectores no perturbados es un proceso lento, la colonización y restauración natural tras perturbaciones de origen antrópico parece tener aún más complicaciones. En Sierra Nevada, la regeneración del matorral de alta montaña tras un incendio se ve dificultada porque no hay especies rebrotadoras, que sí son abundantes en la media montaña, como la encina (*Quercus ilex*), el enebro de miera (*Juniperus oxycedrus*), el torvisco (*Daphne gnidium*) o el durillo (*Viburnum tinus*), entre muchas otras. Por tanto, la única vía de regeneración de las especies del matorral de alta montaña es a través de la germinación de semillas, bien las enterradas en el suelo que pueden sobrevivir al fuego, bien las provenientes de plantas reproductoras situadas en las zonas adyacentes no perturbadas. Sin embargo, sólo las semillas del piorno parecen capaces de sobrevivir al fuego, y germinar después simultáneamente, a juzgar por la presencia de esta especie en las zonas recién quemadas y la homogeneidad existente en el tamaño de los individuos⁶⁸. Incluso las densidades y coberturas de piornos son mayores en las zonas incendiadas que en las zonas no perturbadas adyacentes. Por el contrario, las semillas del enebro no sobreviven al fuego, ya que no aparecen plántulas tras el incendio. La restauración de sus poblaciones requiere, por tanto, de la llegada de semillas provenientes de zonas adyacentes no quemadas.

Dado que el fuego elimina a las especies leñosas del matorral de montaña, que no son rebrotadoras, y que también son consumidas por ovejas y cabras^{69,70,71}, el resultado puede ser una menor cantidad y diversidad de alimento disponible para el ganado ramoneador (fundamentalmente cabras) en las zonas quemadas que en las no quemadas. A esto habría que añadir la pérdida de herbáceas que crecen al amparo de los enebros, especialmente los que tienen la copa más abierta, y que también son consumidas por el ganado. Por otra parte, la erosión por escorrentía en laderas inclinadas se ve muy favorecida tras un incendio, lo que disminuye aún más la ya de por sí mermada disponibilidad de suelo para la germinación y establecimiento de plántulas en la alta montaña. Por lo tanto, el balance final de las quemadas de enebro presenta muchas más consecuencias negativas a medio y largo plazo, que supuestos resultados positivos a corto plazo.

En el caso de las pistas de esquí y carriles, los desmontes ocasionados en su trazado y construcción extraen la capa superficial de tierra, donde se encuentra el banco de semillas y la materia orgánica. Esto elimina la posibilidad de

regeneración a partir de semillas enterradas en el suelo, y exige por tanto la llegada de semillas desde las zonas periféricas no perturbadas. Además, las grandes piedras son apartadas, con lo que se eliminan posaderos para las aves dispersantes, que son los lugares donde más se depositan y acumulan las semillas de enebro²⁹. De este modo, la recolonización y regeneración natural en los carriles y pistas sigue un ritmo más lento aún que la recuperación de las zonas quemadas. Como resultado de la lentitud en la recuperación de cobertura vegetal de leñosas y herbáceas, en ambos tipos de zonas perturbadas, incendios y desmontes, el suelo desnudo es el rasgo predominante en el paisaje. La consecuencia más inmediata de esta falta de protección en el suelo es el incremento de la erosión eólica y por escorrentía.

5.2. RESTAURACIÓN ACTIVA: SIEMBRAS Y PLANTACIONES ANTE LA INCERTIDUMBRE CLIMÁTICA

Como desconocemos la climatología que vamos a tener en el año de la actuación y los siguientes años, nuestra recomendación es: 1) hacer a la vez siembras y plantaciones en los mejores microhábitats de la alta montaña (bajo rocas, bajo enebros o sabinas y junto a acequias de careo), 2) realizar siembras y plantaciones varios años seguidos, para así incrementar las probabilidades de que siembra y plantación coincidan con un año climatológicamente favorable. Esto nos obliga a hacer una planificación de la restauración a largo plazo, incluyendo tanto la obtención de una cantidad adecuada de semillas y de plantas en vivero, como los necesarios seguimientos de las siembras y plantaciones en el campo.

En la Figura 13 se muestra la serie temporal de precipitación en Sierra Nevada durante los últimos setenta años. De los años 1950 a 1980, la mayor parte de los años llueve por encima de la media, situación bien distinta a la que se observa desde la década de los 80 hasta la actualidad. Concretamente desde 1980 hasta la actualidad sólo hay dos años con precipitación por encima de los 800 mm: los años 96/97, y el año 2010. Como la situación climática ideal es tener un año lluvioso para estimular la germinación de la semilla, y otro adicional para que la plántula se establezca con éxito, muy probablemente la última ventana de regeneración que tuvieron los enebrales de Sierra Nevada fueron los años 96 y 97, justo cuando hicimos la primera siembra experimental de semillas (ver Fig. 13). Si no tenemos la gran oportunidad de hacer la siembra o plantación en un año/años excepcionalmente lluvioso, es más que probable que la restauración no prospere, como ocurrió con las siembras que hicimos en los años 2017-2019,

a pesar del gran número de semillas colocadas en los microambientes más idóneos.

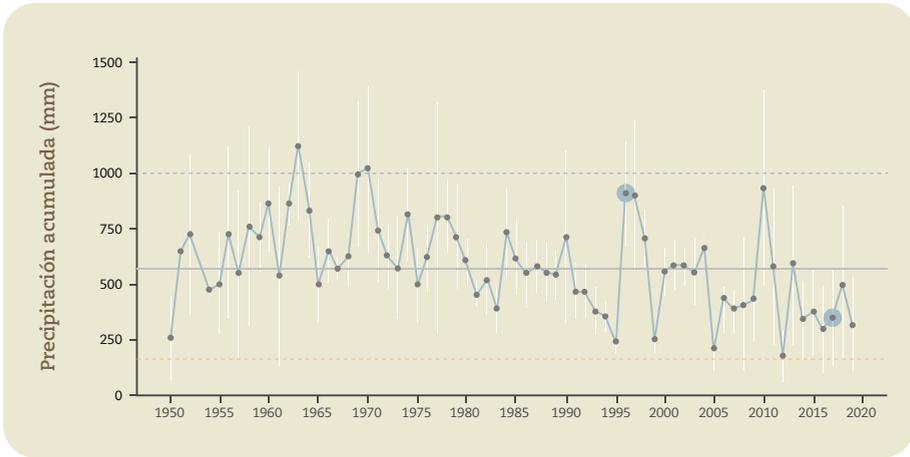


Figura 13. Serie temporal de precipitación en Sierra Nevada durante los últimos setenta años. Se muestran valores de precipitación acumulada para cada año hidrológico. La línea azul representa la media + 2 desviaciones estándar, mientras que la línea roja representa la media - 2 desviaciones estándar. Se indican con círculos los años en los que se realizaron las siembras.

Ya que los enebrales están muy envejecidos, son recomendables las acciones dirigidas a favorecer el rejuvenecimiento de las poblaciones todavía existentes, mediante la siembra o plantación⁵⁷, usando preferentemente semilla de origen local para la restauración. Sin embargo, la plantación de enebros como método de restauración tiene una limitación muy considerable en la fase de producción de planta en vivero. Primero hay que conseguir un número adecuado de semillas viables. Por ejemplo, si queremos partir de 10.000 semillas viables para las siembras, que nos darían potencialmente unas 2.000-4.000 plántulas en el vivero, necesitamos recolectar como mínimo 8 o 10 veces más semillas = 80.000-100.000 semillas recogidas a ser posible de excrementos de aves, lo que implica recoger muchas arcéstidas maduras, o mucho mejor, muchos excrementos de túrdidos con semillas depositadas en posaderos y bebederos, ya que las aves consumen selectivamente las arcéstidas más sanas, que son también las que tienen más proporción de semillas sanas. En el laboratorio hay que separar las semillas sanas (con el endospermo desarrollado) de las abortadas o predadas, que no nos sirven para la germinación. Luego hay que esperar a que las semillas germinen, unos 18 meses. Posteriormente hay que esperar a que la

plántula lignifique, un par de años mínimo. Por tanto, conseguir una primera tanda de plantones requiere 4 años desde que se recolectan las semillas. Para la plantación, lo ideal sería esperar 2-3 de años más, para que el plantón crezca y desarrolle su sistema radicular en el alveolo. Ello hace que la restauración con plantones tenga que estar planificada con mucha antelación, y requiere necesariamente:

- 1) un equipo de recolectores de semillas que emplee bastantes horas de campo en recolectar una cantidad ingente de semillas (porque cada vez los enebros producen menos semillas), sabiendo que sólo una pequeña fracción de las mismas será viable;
- 2) un vivero que nos permita hacer la siembra de semillas y el mantenimiento de las plántulas en condiciones adecuadas durante 3-6 años;
- 3) unas jornadas de plantación donde participen muchas personas para cubrir la mayor superficie posible.

Tanto las siembras como las plantaciones conviene repetirlas durante varios años seguidos, a la espera de encontrar un año/años climáticamente favorables. Una vez hecha la siembra o plantación, hay que hacer un seguimiento de la cohorte de plántulas emergidas para evaluar el éxito de la misma varios años tras la plantación/siembra. En definitiva, que se requerirá más de una década entre la recolección de semillas y obtención de planta hasta su plantación y seguimiento posterior para coincidir con años climatológicamente benignos.

Por ello, la restauración activa del enebro solo se puede abordar desde un plan de acción y seguimiento a largo plazo en el marco de un ambicioso proyecto de gestión adaptativa, que sea capaz de realizar siembras y plantaciones y mantener el necesario seguimiento de las mismas en varios años seguidos a la espera de encontrar algún año climatológicamente adecuado. Esta planificación a largo plazo en las actuaciones es algo que ahora mismo está alejado de las prácticas habituales de restauración, basadas en actuaciones puntuales muchas veces carentes de seguimiento. El problema no es sólo disponer de los medios humanos y económicos necesarios. El problema fundamental es salir de la inercia de las actuaciones basadas en expedientes administrativos puntuales, para asumir con todas las consecuencias la necesaria planificación a largo plazo de las actuaciones según los objetivos integradores marcados en el diseño del proyecto de restauración. Dicha planificación a largo plazo debe incluir un programa de seguimiento de la restauración que nos permita conocer, cuantificar e interpretar en un contexto científico las causas de los éxitos y fracasos, para incorporar ese conocimiento a las futuras actuaciones.

RECOMENDACIONES PARA LA RESTAURACIÓN DEL ENEBRAL EN EL ÁMBITO ESQUIABLE

Como hemos comprobado, la restauración del enebral es un proceso lento y supeditado a multitud de incertidumbres. Por lo tanto, la principal recomendación va dirigida a velar por la integridad de los enebros que aún sobreviven en el ámbito de la estación de esquí de Sol y Nieve de Sierra Nevada. Evitar cualquier perturbación es esencial puesto que su recuperación comprende un proceso costoso y que llevará décadas para obtener resultados. Llegados a este punto, nuestra experiencia muestra que la recogida de semillas procedentes de excrementos de mirlo capiblanco recogidos en las inmediaciones de la zona a restaurar es la base de la estrategia. Los mirlos habrán seleccionado por nosotros una alta proporción de semillas potencialmente viables. Es necesario recolectar miles de semillas, pues de ellas solamente una exigua fracción llegarán a convertirse en enebros con ciertas posibilidades de sobrevivir. El tratamiento de la semilla consiste en una minuciosa limpieza a través del cual se retira toda la pulpa y partes blandas y en la identificación de posibles semillas infectadas a través de un proceso de flotación. Posteriormente se puede destinar una parte de las semillas para hacer siembras en el medio natural y la otra para producir planta en vivero. Las siembras en campo deberán de distribuirse en diferentes años a fin de maximizar las probabilidades de que ocurra una ventana climática favorable. Los sitios ideales para la siembra serán los más húmedos y resguardados del pisoteo del ganado. Se recomienda por tanto ubicar las siembras al abrigo de rocas en las proximidades de fuentes de agua o cobijadas al abrigo de otros enebros u otras especies vegetales que puedan facilitar la germinación. Las semillas han de introducirse a unos tres o cinco centímetros de profundidad tras remover la tierra. Se sembrarán en grupos de unas diez semillas separadas entre sí por un mínimo de cinco centímetros y, posteriormente, se protegerá la pequeña zona de siembra con una rejilla confeccionada con malla electrosoldada (1 cm de luz de malla) que quedará bien fijada al terreno y que limitará la depredación por parte de roedores.

Respecto a las semillas destinadas a producir planta en vivero, hay que tener en cuenta que hasta el cuarto año no dispondremos de planta lignificada y lista para ser trasladada al campo con ciertas posibilidades de supervivencia. Lo ideal será esperar uno o dos años más para propiciar que el plantón madure. Ello implica que la plantación no se realizará hasta pasados 4-6 años desde el momento de la colecta de las semillas. La plantación en campo ha de venir precedida por ciertas actuaciones de preparación del terreno. Inicialmente, se debería de vallar el perímetro del parche a repoblar a fin de evitar el impacto de los herbívoros. Posteriormente se recomienda realizar el ahoyado de forma que se genere un pequeño alcorque o microcuenca en donde se facilite la conservación de la humedad y la recogida de aguas superficiales. Una vez instalada la planta, es recomendable rodear el plantón de piedras que ayuden a minimizar la evapotranspiración y permitan conservar algo de humedad en el entorno de la planta. La clave del éxito de esta actuación podría estar en los aportes de agua suplementarios durante periodos críticos (mitad del verano). También se recomienda un riego de instalación justo tras la plantación. Estos riegos son complejos en lugares poco accesibles, aunque en el ámbito del dominio esquiable consideramos que pueden darse las condiciones que permitan suministrar estos riegos (con mangueras, cubas transportadas en vehículos...). Al igual que las siembras, las plantaciones también deberán de distribuirse en diferentes años para incrementar la probabilidad de coincidir con algún periodo más húmedo. Las plantaciones deberán de hacerse a comienzos del otoño, antes de que el suelo empiece a congelarse durante la noche. A partir de aquí, solamente queda esperar y realizar seguimientos que permitan incorporar el aprendizaje a futuras experiencias, de acuerdo a un modelo de gestión adaptativa. Esta es la única forma de ir perfeccionando la técnica. Si lo que se pretende es recuperar lo más rápido posible la cobertura de vegetación arbustiva, el piorno se regenera y crece mucho más rápido que el enebro en las actuales condiciones climáticas, por lo que la mejor estrategia sería dejar que el piornal fuera cubriendo las pistas. Habrá que esperar varias décadas para poder ver un enebro restaurado que comienza a consolidarse, y el proceso hasta llegar a ese punto será muy costoso. En conclusión, la principal recomendación en el entorno de las pistas de esquí es velar

de forma estricta por la conservación de los pies de planta que aún persisten, y usarlos como núcleos de colonización para la expansión natural del matorral y pastizal de la alta montaña en su entorno inmediato, aprovechando el efecto facilitador que el enebro ejerce sobre muchas otras especies del matorral y pastizal de la alta montaña.



Foto 23. Estación de esquí de Sol y Nieve, Sierra Nevada.

5.3. LAS SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA COMO MEJOR ESTRATEGIA PARA LA ADAPTACIÓN

Nuestros datos nos llevan a la conclusión de que cualquier gestión que implique la quema o el arranque de los matorrales de enebro en la alta montaña de Sierra Nevada da lugar a suelos desnudos durante muchos años, incluso varias décadas, después de la perturbación. La aridez estival del clima mediterráneo, agudizada durante estas últimas décadas, ha colapsado prácticamente la capacidad de regeneración del enebral, por lo que su área de distribución en la alta montaña de Sierra Nevada ha disminuido al ritmo marcado por los desmontes y las quemaduras. Esta limitación climática dificulta también los intentos de restauración activa del enebral. Los incendios y desmontes del enebral llevan consigo tanto la pérdida de cobertura vegetal e incremento de la erosión del suelo, como

de la diversidad de especies herbáceas endémicas, muchas de ellas asociadas al enebro climático¹¹. Donde un enebro desaparece, en el mejor de los casos aparece un piornal, con una pérdida significativa en la provisión de determinados servicios ecosistémicos en la alta montaña, como la gran biodiversidad vegetal y animal asociada al enebro, calidad y cantidad de pastos, fijación de carbono en vegetación y suelo, creación de islas de fertilidad, etc. Por tanto, el camino más eficaz y menos costoso para la conservación y gestión de los enebrales y sus usos tradicionales pasa más por el mantenimiento de los todavía existentes que por los intentos de recuperación de los ya perdidos, especialmente en el actual contexto de cambio climático.

La regeneración actual del enebro en las actuales condiciones climáticas de Sierra Nevada se produce esencialmente en años excepcionalmente lluviosos, que constituyen las “ventanas de regeneración” naturales del enebro, y que son cada vez más escasos. Frente a este escenario climático tan negativo, el mutualismo planta-dispersante es lo único que todavía le va bien al enebro en las actuales condiciones ecológicas de la alta montaña. Sin embargo, esta



Foto 24. Las acequias de careo representan una solución basada en la naturaleza que facilita los procesos de adaptación en la alta montaña.

interacción mutualista se está debilitando fundamentalmente porque cada vez llegan menos mirlos capiblanco a Sierra Nevada (Fig. 7), pero también por la predominancia de años cada vez más secos, que hacen que las plantas produzcan cada vez menos arcéstidas (y por tanto menos semillas para la dispersión). Esa dominancia de años secos también está colapsando la regeneración poblacional, provocando mortalidades masivas de plántulas. El debilitamiento de la interacción mutualista amenaza aún más la supervivencia de las poblaciones de enebro en Sierra Nevada, que persisten en la alta montaña precisamente por la extremada longevidad de los individuos ya establecidos.

En este contexto surge el concepto de soluciones basadas en la naturaleza o en los usos tradicionales como herramienta auxiliar para la conservación de los enebrales de Sierra Nevada y su vegetación asociada. Un claro ejemplo lo constituyen las acequias tradicionales de careo. Se trata de infraestructuras hidráulicas que en muchos casos fueron construidas hace más de cinco siglos. El agua es conducida desde los arroyos, manantiales y rezumaderos hasta los careos y las simas y mientras tanto va recorriendo las laderas de la montaña generando verdor a su paso. Esto ocurre sobre todo ladera abajo de la propia acequia. Este proceso permite la distribución de los recursos hídricos por la ladera, aportando humedad durante el verano y favoreciendo el desarrollo de determinadas especies vegetales, como el enebro. El conocimiento existente indica que la germinación del enebro depende de microhábitats húmedos y en este contexto de ciclos de sequía cada vez más frecuentes, los aportes hídricos de la acequia pueden resultar cruciales. En general, estas acequias mejoran las condiciones del ecosistema para albergar biodiversidad. Además, estas acequias funcionan como bebederos para las aves que dispersan las semillas del enebro. Por lo tanto, en los márgenes de las acequias de montaña se produce una concentración considerable de semillas, que tienen mayores probabilidades de germinar que las situadas en lugares más secos. Por otra parte, la distribución longitudinal, manteniendo la pendiente, de las acequias por multitud de laderas de la sierra hace que aparezcan como verdaderas infraestructuras verdes, lineales y dendríticas, con una gran capacidad de transmitir con rapidez los procesos ecológicos (en este caso, la regeneración del enebro) a escala de toda Sierra Nevada.

5.4. SÍNTESIS DE RECOMENDACIONES

Basándonos en el conocimiento adquirido sobre la ecología de los enebrales de Sierra Nevada, ofrecemos varias recomendaciones básicas para la conservación y restauración del enebro en las actuales condiciones climáticas:

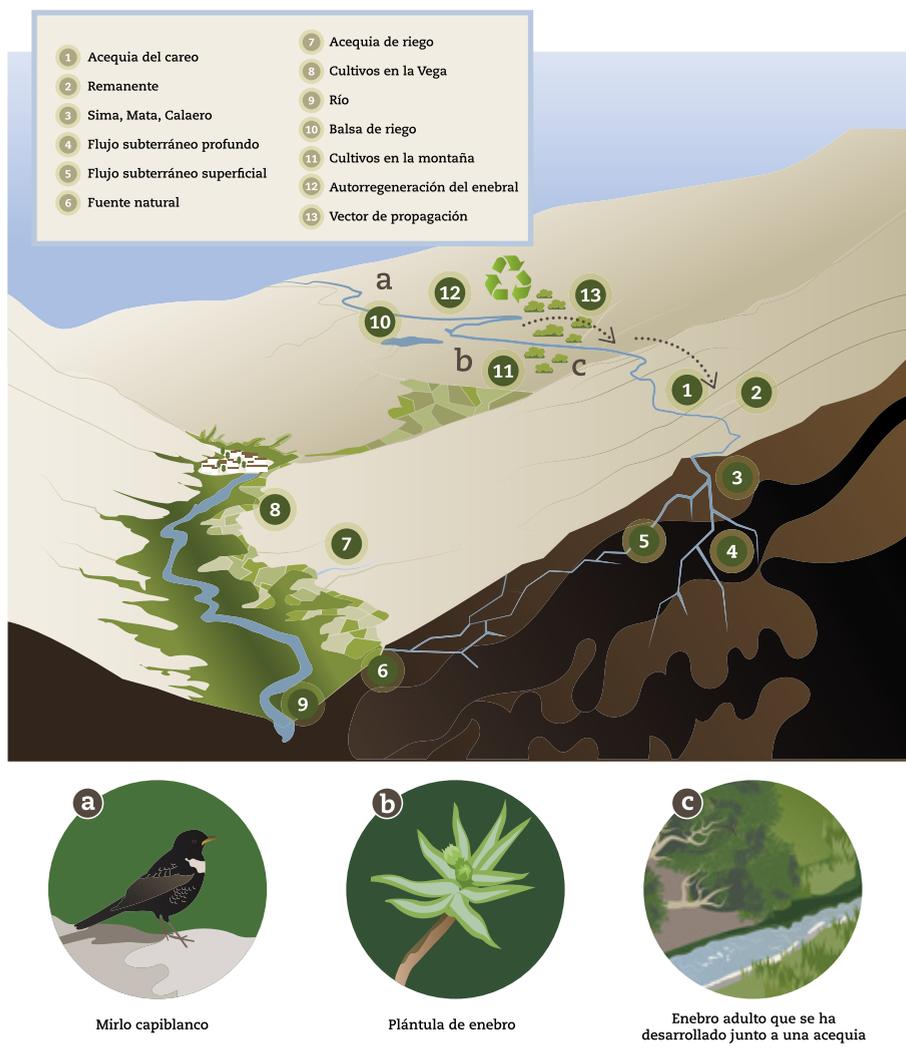


Figura 14. Funcionamiento de un sistema de acequias de careo a lo largo de la ladera, mostrando sus implicaciones en la propagación del enebro (modificado de ⁷²).

1. Conservación estricta de las poblaciones y ejemplares de enebro y sabina que todavía existen en la alta montaña. La extrema longevidad de los individuos garantiza la persistencia de las poblaciones en el actual ambiente climático hostil, siempre y cuando se respete a los enebros ya establecidos. Esta primera recomendación es incompatible con realizar más desmontes para carriles o pistas de esquí que obliguen a arrancar enebros o sabinas.

2. Mantenimiento de las acequias tradicionales de “careo” para proporcionar un extra de humedad edáfica durante el verano que ayude a la regeneración y expansión natural de los enebrales y su comunidad asociada. Las acequias de careo actúan como verdaderas infraestructuras verdes en la alta montaña, favoreciendo la regeneración del enebro en toda Sierra Nevada.

3. Seguimiento del estado de conservación de los enebrales-piornales nevadenses, de su dinámica de expansión altitudinal y de su capacidad de colonización de antiguas terrazas de cultivo, carriles y pistas de esquí, mediante el uso de teledetección (sensores remotos) en combinación con la evaluación *in situ* de campo. Dichos seguimientos se deben de hacer a lo largo de todo el gradiente altitudinal de los enebrales y en todas las vertientes de Sierra Nevada, centrándose en el límite altitudinal superior, que es de donde menos información se dispone actualmente y más puede afectar el cambio climático.

4. Conservación estricta de las especies de aves que dispersan sus semillas, especialmente en la situación actual donde sus poblaciones han disminuido mucho en comparación con hace 30-40 años. Hay que evitar toda actividad que ahuyente a estas aves durante su corta estancia en los enebrales de Sierra Nevada.

5. Puesta en marcha de acciones de restauración con una planificación a largo plazo, y un seguimiento de los resultados siguiendo un modelo de gestión adaptativa que nos permita aprender de los resultados obtenidos. Dichas actuaciones deben considerar la necesidad de hacer siembras y plantaciones durante varios años seguidos buscando algún año climatológicamente favorable. La información obtenida, junto a toda la información científica ya existente, nos permitirá diseñar y poner a punto una herramienta de apoyo a la toma de decisiones similar a la que ya hemos elaborado para la gestión de los pinares de repoblación en Sierra Nevada (por ejemplo *diveRpine*: Diversification of Pine plantations; <https://ajpelu.github.io/diveRpine/>).

6. Tanto las actividades de siembra y plantación, como los seguimientos de aves dispersantes se pueden incorporar en proyectos de ciencia ciudadana que sirvan para hacer partícipes a la sociedad de la problemática de conservación y de los impactos que amenazan a los enebrales en Sierra Nevada.

7. Las acciones de conservación y restauración de los enebrales en Sierra Nevada deben de ser un espacio de colaboración que, partiendo de la transferencia de conocimiento científico, potencie el diseño, aprendizaje y la participación

conjunta, aunando el trabajo de los responsables y técnicos medioambientales, los investigadores y los ciudadanos.

8. Se debe de trabajar en materia de comunicación y difusión para trasladar a la ciudadanía la singularidad de estos ecosistemas de alta montaña y la importancia de conservarlos e invertir recursos en su manejo y protección.



Foto 25. Parte del equipo del proyecto Life Adaptamed durante una visita de campo a los enebrales del Valle del río San Juan (Parque Nacional de Sierra Nevada).



The background features a large, light blue circle on the left side, partially overlapping a white circle. Above these, a brown shape with a scalloped bottom edge is visible. In the top left corner, a small photograph shows a rocky, mountainous landscape with green grass and yellow flowers in the foreground.

06

REFERENCIAS

6. REFERENCIAS

1. Giorgi, F. Lionello, P. 2008. Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change* 63(2-3), 90-104.
2. Giorgi, F. 2006 Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters* 33, L08707.
3. IPCC (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, a., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.L., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., Zhou, B. (eds.)]. Cambridge University Press.
4. Doblas-Miranda, E., Alonso, R., Arnan, X., Bermejo, V., Brotons, L., de las Heras, J., Estiarte, M., Hódar, J. A., Llorens, P., Lloret, F., López-Serrano, F. R., Martínez-Vilalta, J., Moya, D., Penuelas, J., Pino, J., Rodrigo, A., Roura-Pascual, N., Valladares, F., Vila, M., Zamora, R., Retana, J. 2017. A review of the combination among global change factors in forests, shrublands and pastures of the Mediterranean Region: Beyond drought effects. *Global and Planetary Change* 148, 42-54.
5. Young, J.C., Waylen, K.A., Sarkki, S. 2014. Improving the science-policy dialogue to meet the challenges of biodiversity and conservation: having conversations rather than talking at one-another. *Biodiversity Conservation* 23, 387-404.
6. Sutherland, W.J., Pullin, A.S., Dolman, P.M., Knight, T.M. 2004. The need for evidence-based conservation. *Trends in Ecology and Evolution* 19, 305-308.
7. Jordano, P., Zamora, R., Marañón, T., Arroyo, J. 2002. Claves ecológicas para la restauración del bosque mediterráneo. Aspectos demográficos, ecofisiológicos y genéticos. *Ecosistemas* 11(1).
8. Zavala, M.A., Zamora, R., Pulido, F. 2008. Nuevas perspectivas en la conservación, restauración y gestión sostenible del bosque mediterráneo. En: Valladares, F. 2008. *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante* (2ª edición). Pp.: 511-532. Ministerio de Medio Ambiente. EGRAF, S. A., Madrid. Pp.: 511-532.
9. Zamora, R., Pérez-Luque, A.J., Bonet, F.J., Barea-Azcón, J.M., Aspizua, R. 2016. Global Change Impacts in Sierra Nevada: Challenges for Conservation. *Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Junta de Andalucía* 208p.
10. García, D., Zamora, R., Gómez, J.M., Jordano, P., Hódar, J.A. 2000. Geographical variation in seed production, predation and abortion in *Juniperus communis* throughout its range in Europe. *Journal of Ecology* 88, 436-446.
11. Lorite, J. 2002. La vegetación de Sierra Nevada. En: Blanca, G. (Ed.) *Flora amenazada y endémica de Sierra Nevada*. Editorial Universidad de Granada, Granada, pp 23-45.
12. García, D., Zamora, R., Hódar, J.A., Gómez, J.M. 1999. Age structure of *Juniperus communis* L. in the Iberian peninsula: conservation of remnant populations in Mediterranean mountains. *Biological Conservation* 87, 215-220.
13. Arroyo, J., Abellán, P., Arista, M., Ariza M.J., Castro, A., Escudero, M., Lorite, J., Martínez-Borda, E., Mejías, J.A., Molina-Venegas, R. Pleguezuelos, J.M., Simón-Porcar, V., Viruel, J. 2022. Sierra Nevada, a Mediterranean biodiversity super hotspot. En: Zamora, R., Oliva, M. (eds). *The Landscape of Sierra Nevada: A unique laboratory of global processes*. Springer Nature.
14. Lorite, J., Lamprech, A., Peñas, J., Rondinel, C., Fernandez-Calzado, R., Benito, B., Cañadas, E. 2022. Altitudinal Patterns and Changes in the Composition of High Mountain Plant Communities. En: Zamora, R., Oliva, M. (eds). *The Landscape of Sierra Nevada: A unique laboratory of global processes*. Springer Nature.
15. Polunin, O., Walter, M. 1985. *A guide to the vegetation of Britain and Europe*. Oxford University press, Oxford 236pp.
16. GBIF.org (26 January 2022) GBIF Occurrence Download <https://doi.org/10.15468/dl.9q33f5>

17. Pérez-Luque, A.J., Bonet-García, F.J., Zamora, R. 2019. Map of ecosystems types in Sierra Nevada mountain (southern Spain). PANGAEA. doi: <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.910176>.
18. Zamora, R., Hódar, J.A., Pérez-Luque, A.J., Barea-Azcón, J.M. 2022. Response of animal populations and communities to climate change and land-use shifts. In: Zamora R y Oliva M. (eds) The landscape of the Sierra Nevada: a unique laboratory of global processes in Spain. Springer Nature.
19. Roques, A., Raimbault J.P., Goussard F. 1984. La colonisation des cônes et des galbules des genévriers méditerranéens par les insectes et acariens et son influence sur les possibilités de régénération naturelle de ces essences, *Ecologia Mediterranea* 10, 147-169.
20. García, D. 1998. Regeneración natural del enebro *Juniperus communis* L. en áreas de alta montaña mediterránea: conectando la ecología reproductiva con el reclutamiento poblacional. Tesis Doctoral. Universidad de Granada, Granada, España.
21. García, D., Zamora, R., Gómez, J.M., Hódar, J.A. 2002. Annual variability in reproduction of *Juniperus communis* L. in a Mediterranean mountain: relationship to seed predation and weather. *Ecoscience* 9, 251-255.
22. Roques, A. 1983. Les insectes ravageurs des cônes et graines des conifères en France. Inra Versailles, 138 p.
23. Roques, A. 1989. New results and some thinkings about significance and induction of prolonged diapause in cone insects with particular references to the larch cone fly (*Lussima melania*) and to the Douglas-fir seed chalcid (*Megastigmus spermotrophus*). En: Miller G.E. (ed.), Proc. 3rd Cone and Seed Insects Working Party Conference (UFRO S2.07-OL), Victoria 1988, For. Can. Pacific For. Cent., Victoria, Canada, 1989, pp. 64-81.
24. García, D. 1998. Interaction between Juniper *Juniperus communis* L. and its fruit pest insects: pest abundance, fruit characteristics and seed viability. *Acta Oecologica* 19, 517-525.
25. Herrero, A., Zamora, R. 2014. Plant responses to extreme climatic events: a field test of resilience capacity at the southern range. *PLoS ONE* 9(1), e87842.
26. Matias, L., Jump, A. 2015. Asymmetric changes of growth and reproductive investment herald altitudinal and latitudinal range shifts of two woody species. *Global Change Biology* 21, 882-896.
27. García, D. 2001. Effects of seed dispersal on *Juniperus communis* recruitment on a Mediterranean mountain. *Journal of Vegetation Science* 12, 839-848.
28. Verheyen, K., Adriaenssens, S., Gruwez, R., Michalczyk, I.M., Ward, L.K., Rosseel, Y, Van den Broeck A, García, D. 2009. *Juniperus communis*: victim of the combined action of climate warming and nitrogen deposition? *Plant Biology* 11, 49-59.
29. García, D., Gómez, J.M., Hódar, J.A., Zamora, R., 1996. Ecología reproductiva del enebro *Juniperus communis* L. en Sierra Nevada: factores que determinan la regeneración natural de las poblaciones. En: Chacón J., Rosúa, J.L. (eds.). Sierra Nevada: Conservación y Desarrollo Sostenible, vol. 2. Universidad de Granada, Granada, pp. 441-453.
30. Falinski, J.B. 1980. Vegetation dynamics and sex structure of the populations of pioneer dioecious woody species. *Vegetatio* 43, 23-38.
31. Rosen, E. 1988. Development and seedling establishment within a *Juniperus communis* stand on O land, Sweden. *Acta Botanica Neerlandica* 37, 193-201.
32. García, D., Zamora, R., Gómez, J.M., Hódar, J.A. 1999b. Bird rejection of unhealthy fruits reinforces the mutualism between juniper and its avian dispersers. *Oikos* 84, 536-544.
33. Jordano, P. 1993. Geographical ecology and variation of plant-seed disperser interactions: southern Spanish junipers and frugivorous thrushes. En: Fleming, T. H., Estrada, A. (eds), Frugivory and seed dispersal: ecological and evolutionary aspects. *Vegetatio* 107/108, 85-104.

34. Zamora, R. 1990. The fruit diet of ring-ouzel (*Turdus torquatus*) wintering in Sierra Nevada (South-East Spain). *Alauda* 58, 67-70.
35. Castro, J., Zamora, R., Hódar J.A. 2002. Use of shrubs as nurse plants: a new technique for reforestation in Mediterranean mountains. *Restoration Ecology* 10, 297-305.
36. Castro, J., Zamora, R., Hódar J.A. 2006. Restoring the forests of *Quercus pyrenaica* Willd. using pioneer shrubs as nurse plants. *Applied Vegetation Science* 9, 137-142.
37. Gómez-Aparicio, L., Zamora, R., Gómez, J.M. 2004. Applying plant facilitation to forest restoration in Mediterranean ecosystems: a meta-analysis of the use of shrubs as nurse plants. *Ecological Applications* 14, 1128-1138.
38. Zamora, R., García-Fayos, P., Gómez-Aparicio, L. 2004. Las interacciones planta-planta y planta-animal en el contexto de la sucesión ecológica. En: Valladares, F. (ed.) *Ecología del bosque Mediterráneo en un mundo cambiante*. Editorial Parques Nacionales, Madrid, ES. pp. 371- 393.
39. Matías, L., Mendoza, I., Zamora, R. 2009. Consistent pattern of habitat and species selection by post-dispersal seed predators in a Mediterranean mosaic landscape. *Plant Ecology* 203, 137-147.
40. García, D., Zamora, R., Gómez, J.M. 2000. Do empty *Juniperus communis* seeds act as a defence against seed predation by *Apodemus sylvaticus*? *Ecoscience* 7, 214-221.
41. García, D., Zamora, R., Hódar J.A. 2000. Yew (*Taxus baccata* L.) Regeneration is facilitated by fleshy-fruited shrubs in Mediterranean environments. *Biological Conservation* 95:31-38.
42. Mendoza, I., Gómez-Aparicio, L., Zamora, R., Matías, L. 2009. Recruitment limitation of forest communities in a degraded Mediterranean landscape. *Journal of Vegetation Science* 20, 367-376.
43. Gómez-Aparicio, L., Gómez, J.M., Zamora, R., Boettinger, J. 2005. Canopy vs soil effects of shrubs facilitating tree seedlings in Mediterranean montane ecosystems. *Journal of Vegetation Science* 16, 191-198.
44. Gómez-Aparicio, L., Gómez, J.M., Zamora, R. 2005. Microhabitats shift rank in suitability for seedling establishment depending on habitat type and climate. *Journal of Ecology* 93, 1194-1202.
45. Gómez-Aparicio, L., Valladares, F., Zamora, R. 2006. Differential light responses of Mediterranean tree saplings: linking ecophysiology with regeneration niche in four co-occurring species. *Tree Physiology* 26, 947-958.
46. Gómez-Aparicio, L., Zamora, R., Castro, J., Hódar, J.A. 2008. Facilitation of tree saplings by nurse plants: microhabitat amelioration or protection against herbivores. *Journal of Vegetation Science* 19, 161-172.
47. 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.
48. Matías, L., Zamora, R., Castro, J. 2011. Repercussions of simulated climate change on the diversity of woody-recruit bank in a Mediterranean-type ecosystem. *Ecosystems* 14, 672-682.
49. Matías, L., Zamora, R., Castro, J. 2012. Sporadic rainy events are more critical than increasing drought intensity for woody species recruitment in a Mediterranean community. *Oecologia* 169, 833-844.
50. Baraza, E., Zamora, R., Hódar, J.A. 2006. Conditional outcomes in plant-herbivore interactions: neighbours matter. *Oikos* 113,148-156.
51. Baraza, E., Zamora, R., Hódar, J.A., Gómez, J.M. 2007. Plant-Herbivore Interaction: Beyond a Binary Vision. En: Pugnaire, F. I., Valladares, F. (eds). *Handbook of functional plant ecology*. Marcel Dekker Inc, pp. 677-718.
52. Verdú, M., García-Fayos, P. 2003. Frugivorous birds mediate sex-biased facilitation in a deciduous nurse plant. *Journal of Vegetation Science* 14, 35-42.
53. Broome, A., Long, D., Ward, L.K., Park, K.J. 2017. Promoting natural regeneration for the restoration of *Juniperus communis*: a synthesis of knowledge and evidence for conservation practitioners. *Applied Vegetation Science* 20, 397-409.

54. De Frenne, P., Gruwez, R., Hommel, P., De Schrijver, A., Huiskes, R., de Waal, R., Vangansbeke, P. Verheyen, K. 2020. Effects of heathland management on seedling recruitment of common juniper (*Juniperus communis*). *Plant Ecology and Evolution* 153(2), 188-198.
55. Vanden-Broeck, A. Gruwez, R., Cox, K., Adriaenssens, S., Michalczyk, I.M. Verheyen, K. 2011. Genetic structure and seed mediated dispersal rates of an endangered shrub in a fragmented landscape: a case study for *Juniperus communis* in northwestern Europe. *BMC Genetics* 2011 12:73.
56. García, D., Zamora, R. 2003. Persistence and multiple demographic strategies in long-lived mediterranean plants. *Journal of Vegetation Science* 14, 921-926.
57. Ward, L.K. 1982. The conservation of *Juniper*: longevity and old age. *Journal of Applied Ecology* 19, 917-928.
58. Camarero, J.J., Ortega-Martínez, M. 2019. Sancho, the oldest known Iberian shrub. *Dendrochronologia* 53, 32-36.
59. Lenoir, J., Gégout, J.C, Marquet, P. 2008. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science* 320, 1768-1771.
60. Nogués Bravo, D., Araujo, M.B., Lasanta, T. 2008. Climate change in Mediterranean Mountains during the 21st century. *Ambio* 37 (4), 28-285.
61. Thuiller, W., Lavorel, S., Araújo, M.B., 2005. Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 102, 8245-8250.
62. Grabherr, G., Gottfried, M., Pauli, H. 1994. Climate effects on mountain plants. *Nature* 369, 448-448.
63. Kömer, C. 2021. *Alpine Plant Life*. Springer International Publishing, Cham. 349p.
64. Matias, L., Jump, A. 2012. Interactions between growth, demography and biotic interactions in determining species range limits in a warming world: The case of *Pinus sylvestris*. *Forest Ecology and Management* 282, 10-22.
65. 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, 471-483.
66. Benito, B.M., Lorite, J., Pérez-Pérez, R., Gómez-Aparicio, L., Peñas, J. 2014. Forecasting plant range collapse in a mediterranean hotspot: When dispersal uncertainties matter. *Diversity and Distribution* 20, 72-83.
67. Zamora, R., Gómez J.M., García, D., Hódar, J.A. 1996. Ecología reproductiva y regeneración del matorral de la alta montaña a de Sierra Nevada: capacidad de respuesta a las perturbaciones. En: Chacón, J., Rosua, J.L. (eds). *Sierra Nevada: Conservación y Desarrollo Sostenible*, Vol. 2. University of Granada, Granada, Spain. pp. 407-422.
68. Puertas-Ruiz, S. 2022. Tendencias de crecimiento de *Juniperus communis* L. y *Juniperus sabina* L. en relación con el cambio global en Sierra Nevada entre 1977 y 2020. Trabajo de Fin de Máster (TFM) Máster de Conservación, Gestión y Restauración de la Biodiversidad, curso 2021-2022. Universidad de Granada, Facultad de Ciencias.
69. Martínez, T. 1988. Comparación de los hábitos alimentarios de la cabra montés y de la oveja en la zona alpina de Sierra Nevada. *Archivos de Zootecnia* 37, 39-49.
70. Martínez, T. 1988. Utilisation de l'analyse micrographique des fèces pour l'étude du régime alimentaire du bouquetin de Sierra Nevada, Espagne. *Mammalia* 52, 465-473.
71. Martínez, T. 1990. Régimen alimentario de la cabra montés (*Capra pyrenaica*) en la zona alpina de Sierra Nevada durante los meses de Julio y Agosto. *Ecología* 4, 177-183.
72. Espín, R., Ortíz, E., Guzmán, J.R. 2010. Manual del acequero. Agencia Andaluza del Agua. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía 158 p.





07

GLOSARIO DE TÉRMINOS

GLOSARIO

Acequia de careo: son acequias de alta montaña en donde se carea el agua. Se entiende por careo al proceso por el que el hombre conduce y favorece la infiltración del agua de escorrentía y/o del deshielo en el subsuelo para poder captarla posteriormente. El proceso de infiltración del agua superficial hace que su velocidad sea mucho más lenta en un mecanismo que logra retenerla y almacenarla en acuíferos durante cierto periodo de tiempo. Son acequias tradicionales que en ocasiones tienen una antigüedad superior a los cinco siglos.

Arcéstida: fruto del enebro y la sabina. Técnicamente es un estróbilo reducido, con las escamas soldadas y carnosas en el exterior. Contiene de 1 a 3 semillas.

Aves dispersantes: se denomina así al conjunto de aves que participan en el proceso de dispersión de las semillas que ingieren, teniendo un papel esencial en los mecanismos de propagación de multitud de especies vegetales.

Borreguil: término local que se emplea en el ámbito de Sierra Nevada para definir a los pastos húmedos de alta montaña. Aparecen a partir de 2.000 m de altitud alrededor de las corrientes de agua. Estas formaciones vegetales se corresponden fisiológicamente a un pastizal húmedo en verano y cubierto por la nieve durante gran parte del año e incluyen no solo los pastizales higrófilos, sino las comunidades propias de arroyos, fuentes, turberas y aguas nacientes.

Cambio climático: efecto de la actividad humana sobre el sistema climático global, que siendo consecuencia del cambio global afecta, a su vez, a otros procesos fundamentales del funcionamiento del sistema Tierra.

Cambio global: conjunto de cambios ambientales afectados por la actividad humana, con especial referencia a cambios en los procesos que determinan el funcionamiento del sistema Tierra. Se incluyen en este término aquellas actividades que, aunque ejercidas localmente, tienen efectos que trascienden el ámbito local o regional para afectar el funcionamiento global del sistema Tierra.

Conos axilares: bien masculinos o femeninos. En el caso de los masculinos se componen por escamas peltadas dispuestas en espiral con sacos polínicos. En el caso de los femeninos se componen por numerosas escamas que tras su fructificación dan lugar a la arcéstida.

Cotiledón: primera hoja de la planta que surge de un embrión vegetal en el desarrollo temprano de una planta fanerógama, sola o junto a otra u otras. En algunos casos acumula sustancias de reserva.

Endospermo: tejido nutricional formado en el saco embrionario de las plantas con semilla. Es triploide (con tres juegos de cromosomas) y puede ser usado como fuente de nutrientes por el embrión durante la germinación.

Escorrentía: agua procedente de la lluvia que circula libremente por la superficie del terreno.

Especies zoocoras: aquellas que se dispersan con la ayuda de animales.

Gimnosperma: planta vascular y espermatofita, productora de semillas. Este término se aplica debido a que las semillas de estas plantas no se forman en un ovario cerrado, sino que están desnudas. Su flor (definida como una rama de crecimiento limitado productora de hojas fértiles o “esporofilos”) tiene semilla expuesta. En síntesis, las gimnospermas no tienen fruto y, por ello, se diferencian de las angiospermas.

Hemíptero: Orden de insectos al que pertenecen, por ejemplo, chinches, pulgones y cochinillas.

Holártico: región del Planeta que comprende los hábitats presentes en los continentes boreales del mundo. Se divide en la ecozona paleártica (África del Norte y toda Eurasia, con la excepción del sudeste asiático y el subcontinente indio) y la ecozona Neártica (toda Norteamérica hasta el norte de México).

Interacción planta-planta: la regeneración de gran número de especies vegetales presenta un patrón espacial asociado a plantas ya establecidas, lo que sugiere la existencia de un balance neto positivo de las interacciones planta-planta.

Isla de fertilidad: microambiente que se forma bajo la copa de un matorral enriquecido por los aportes de materia orgánica.

Lluvia de semillas: distribución en el espacio del conjunto de semillas una o varias especies de plantas, una vez dispersadas por agentes bióticos o abióticos

Mutualismo: es una interacción biológica, entre individuos de diferentes especies, en donde ambos se benefician y mejoran su aptitud biológica

Plántula: planta en sus primeros estadios de desarrollo, desde que germina hasta que se desarrollan las primeras hojas verdaderas.

Planta dioica: aquella en la que hay individuos machos e individuos hembras

Ramoneo: forma de alimentación en que un herbívoro se alimenta de hojas, brotes tiernos o frutos de plantas, generalmente leñosas.

Reclutamiento: proceso de incorporación de nuevos individuos en una población de plantas, al establecerse plántulas a partir de semillas germinadas.

Resiliencia (ecología): capacidad de los ecosistemas de absorber perturbaciones, manteniendo sus características de estructura, dinámica y funcionalidad prácticamente intactas; pudiendo retornar a la situación previa a la perturbación tras el cese de la misma

Respuesta ecofisiológica: respuesta de un organismo como mecanismo de adaptación de su fisiología a las condiciones ambientales

Senescente: en proceso de envejecimiento. La senescencia en los seres vivos involucra un conjunto de cambios que se van acumulando a medida que pasa el tiempo.

Servicios ecosistémicos: son aquellos beneficios que un ecosistema aporta a la sociedad y que mejoran la salud, la economía y la calidad de vida de las personas. Éstos resultan del propio funcionamiento de los ecosistemas.

Sésil: que vive fijado a una estructura.

Sistema radicular: conjunto de raíces de una misma planta.

Ungulado: Superorden de mamíferos placentarios. Se apoyan y caminan con el extremo de los dedos, o descienden de algún animal que lo hacía. Estos dedos, típicamente están revestidos con una pezuña.

AGRADECIMIENTOS

El presente manual constituye una recopilación exhaustiva del conocimiento existente sobre los enebrales de Sierra Nevada y su comunidad de plantas y animales asociada, con el fin último de ponerlo a disposición de los procesos de toma de decisiones para la conservación y restauración. Este manual difícilmente hubiera sido posible sin la contribución de numerosas personas que han participado en unas u otras partes del proceso de obtención y procesamiento de los datos. La información que se presenta procede en buena medida de los trabajos de campo aplicados a la conservación y restauración del enebro realizados por investigadores de la Universidad de Granada desde los años ochenta en Sierra Nevada. Los Dres. José Antonio Hódar, José María Gómez, Lorena Gómez Aparicio, Elena Baraza, Jorge Castro, Luís Matías y Ana Mellado, entre otros, han contribuido a interpretar los datos de campo en un contexto científico. Los trabajos realizados en los últimos años se insertan en el marco de colaboración institucional del "Observatorio del Cambio Global de Sierra Nevada" (www.obsnev.es) promovido por la Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible de la Junta de Andalucía y la Universidad de Granada.

Los compañeros de la Agencia de Medio Ambiente y Agua José Miguel Muñoz, Miguel Galiana, Mariano Guerrero, Mónica Martínez, Miguel Arrufat, Rogelio López y Antonio Veredas han participado en todo lo relacionado con las siembras y plantaciones, así como en los seguimientos de la evolución de estas experiencias. También queremos agradecer a Huerto Alegre S.L. (especialmente a M. Luz Díaz) y a todos los voluntarios que ayudaron en el transporte y plantación de plantas de enebros, sabinas y agracejos en la finca de San Juan (Sierra Nevada) en el marco del proyecto Life Adaptamed. Los Agentes de Medio Ambiente del Parque Nacional y del Parque Natural de Sierra Nevada también han participado activamente en diferentes etapas de las experiencias mostradas en el presente manual. A Maika, técnico del OAPN en la finca pública Dehesa del San Juan. También queremos mostrar nuestro agradecimiento a los técnicos del Parque, especialmente a Blanca Ramos y a Javier Navarro. Al equipo de gestión del Parque Nacional y del Parque Natural de Sierra Nevada que había cuando se inició el proyecto Life Adaptamed (Javier Sánchez, Ignacio Henares y M. del Mar Lara) y al actual (Fran Muñoz, José Luis Martínez y Miguel Fernández). Al personal del Vivero La Resinera, en especial a Quino, por la producción de enebro, sabinas y agracejos. Lourdes Lázaro, Andrés Alcántara y Santiago Suárez, del Centro de Cooperación para el Mediterráneo de UICN, han gestionado la impresión del manual. Manuel Merino realizó los bocetos de algunas de las figuras que ilustran este manual. M. Ángeles Lizana, de la empresa Creados Visual S.L., ha realizado los trabajos de maquetación, aguantando con paciencia y grandes dosis de amabilidad los envíos de material a última hora y no pocos cambios en infografías y textos. Jean Yves Rasplus, Isaac Cortes Ruiz y Francisco Bruno Navarro Reyes nos cedieron amablemente algunas de las fotografías que ilustran este manual.

Vaya a todos ellos nuestra más sincera gratitud.







Beneficiario Coordinador



Junta de Andalucía

Consejería de Agricultura, Ganadería,
Pesca y Desarrollo Sostenible

Beneficiarios asociados



Junta de Andalucía

Consejería de Agricultura, Ganadería,
Pesca y Desarrollo Sostenible

Agencia de Medio Ambiente
y Agua de Andalucía



PARQUE de las CIENCIAS
ANDALUCÍA - GRANADA



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**



**UNIVERSIDAD
DE ALMERÍA**



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

Coofinanciador



**DANONE
WATERS**

Font
Vella

Lanjarón

Font
Vella

FONT
VILLA
LEONARDO

FONTER