

**Generación y gestión del conocimiento**

Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia – Next Generation EU

# Guía para la adaptación al cambio climático y resiliencia de la Infraestructura Verde en España



foresteCCO

# INDICE

<b>Resumen</b>	4
<b>1 Introducción</b>	6
Infraestructura verde y restauración ecológica	8
El Proyecto ForesteCCo	10
<b>2 Objetivos</b>	12
<b>3 Políticas y marco normativo</b>	13
<b>4 Metodología general</b>	14
<b>5 Identificación de áreas prioritarias para conservar y/o restaurar la conectividad</b>	16
5.1. Áreas relevantes de biodiversidad	17
5.2. Priorización de esfuerzos de gestión de la conectividad ecológica y la infraestructura verde	23
5.3. Solapamiento con los Espacios Naturales Protegidos	25
5.4. Contraste del método	27
<b>6 Directrices técnicas</b>	28
6.1. Restauración pasiva o asistida de la infraestructura verde	30
6.2. Restauración reconstructiva de la infraestructura verde	31
<b>7 Casos de éxito de infraestructura verde y conectividad ecológica</b>	34
<b>Conclusiones</b>	40
<b>Referencias</b>	42
<b>Anexo I. Metodología OE1.</b>	47
Referencias	58
<b>Anexo II. Directrices técnicas (OE2).</b>	60
Referencias	70



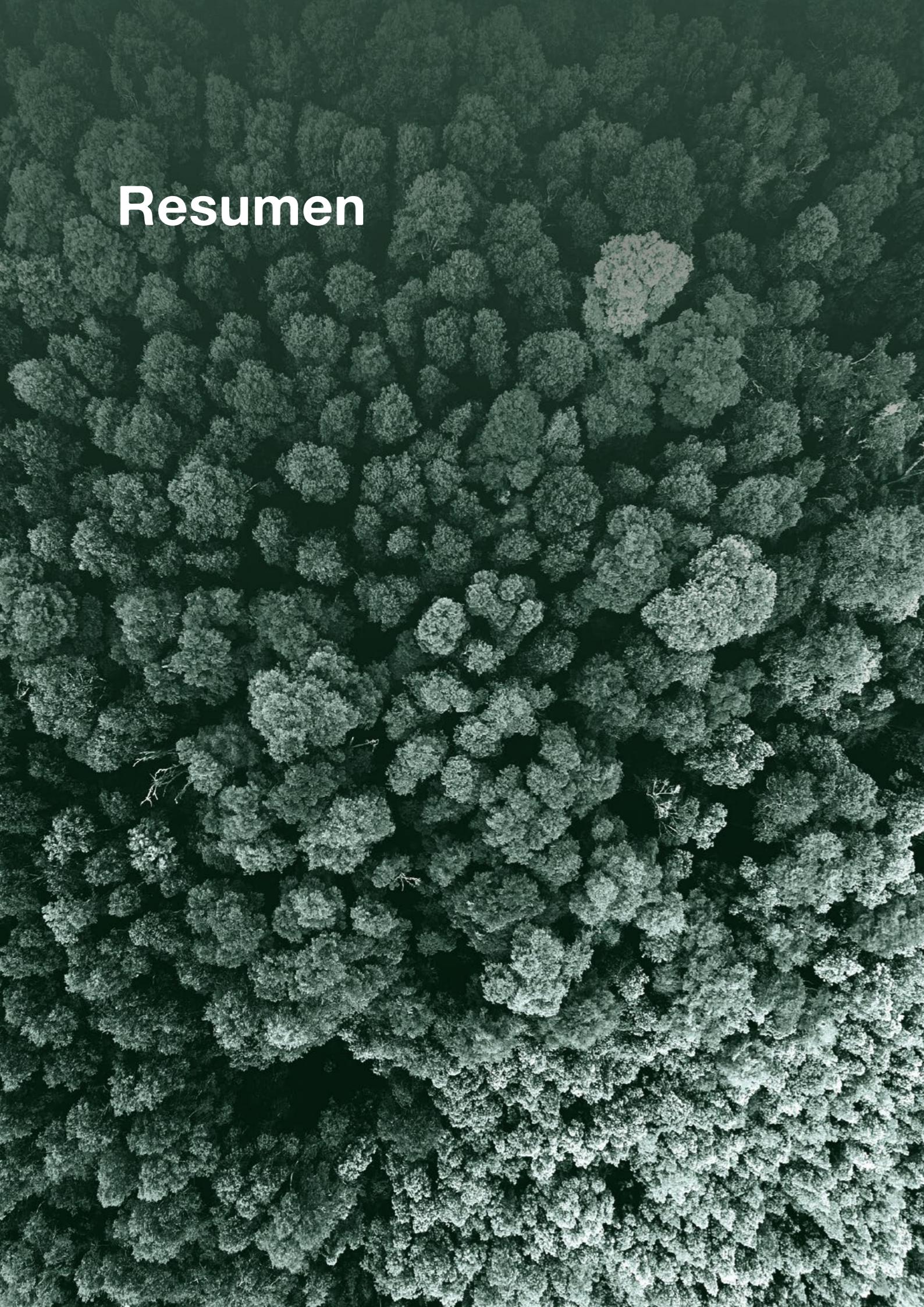
Este documento se enmarca dentro del proyecto **ForesteCCo “FORtaleciendo la RESTauración Ecológica y la infraestructura verde para la adaptación de especies forestales al Cambio Climático”** que cuenta con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), con fondos de la Unión Europea - NextGenerationEU.

**Cita sugerida.** García Pose, A., Rey Benayas, J. M, Soria Eiroa, E. G., Ayuso Castells, R., Rodríguez-Ruiz, G., Alía, R., del Carre, M., Chacón-Moreno, E., Fernández, J. M., García del Barrio, J. M., Gaitán, E., Grivet, D., Guadaño-Peyrot, C., Mateo, R. G., Morales-Barbero, J., Olsson, S. y Ribalaygua, J. 2025. *Guía para la adaptación al cambio climático y resiliencia de la Infraestructura Verde en España*. Fundación Internacional para la Restauración de Ecosistemas (FIRE), Madrid.



Este material se distribuye bajo la licencia CC BY-NC. Para ver una copia de esta licencia, visita <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es>

# Resumen



Esta guía es un resultado del proyecto **FORtaaleciendo la RESTauración Ecológica y la infraestructura verde para la adaptación de especies forestales al Cambio Climático** (ForesteCCo), desarrollado conjuntamente por la Fundación para la Investigación del Clima (FIC), el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA)-CSIC, la Universidad Autónoma de Madrid (UAM) y la Fundación Internacional para la Restauración de Ecosistemas (FIRE). El objetivo de este proyecto es investigar el impacto esperado del cambio climático en las principales especies forestales de la Península Ibérica para la restauración ecológica y la gestión de la infraestructura verde. La guía mejora el conocimiento existente sobre fragmentación y conectividad ecológica y su relación con la conservación de la biodiversidad para la planificación de infraestructura verde en España peninsular e Islas Baleares en el contexto actual de cambio climático.

En primer lugar, presenta el marco conceptual y de contexto, analizando cómo el cambio climático afecta a la infraestructura verde y la conectividad ecológica, el papel del proyecto ForesteCCo en este ámbito y la normativa y estrategias que respaldan la relevancia del trabajo realizado.

A continuación, la guía presenta la metodología y los resultados principales en tres bloques que se corresponden con los tres objetivos específicos del trabajo:

- 1. Identificación de áreas de alto valor ecológico** prioritarias para la conservación de la biodiversidad. Esta información es clave para la planificación estratégica de la mejora de la infraestructura verde.
- 2. Directrices técnicas en materia de infraestructura verde** necesarias para mantener o restaurar la conectividad entre las áreas identificadas como prioritarias, integrando la adaptación al cambio climático por parte de las administraciones y otras entidades relacionadas con la gestión de la infraestructura verde.
- 3. Estrategias de gestión de la infraestructura verde y de la conectividad** mediante la presentación de casos de éxito, incorporando una visión holística y las perspectivas de género y edad. Esta información contribuye a la transferencia del conocimiento, la inspiración y la replicabilidad de proyectos exitosos en otros territorios.

En conclusión, esta guía proporciona un marco integral para la planificación y gestión de la infraestructura verde en España que tiene en cuenta el cambio climático, promoviendo la necesidad de un enfoque holístico, que combine ciencia, técnicas de restauración, gobernanza inclusiva y adaptación climática para garantizar ecosistemas más resilientes y sostenibles a largo plazo.

# 1

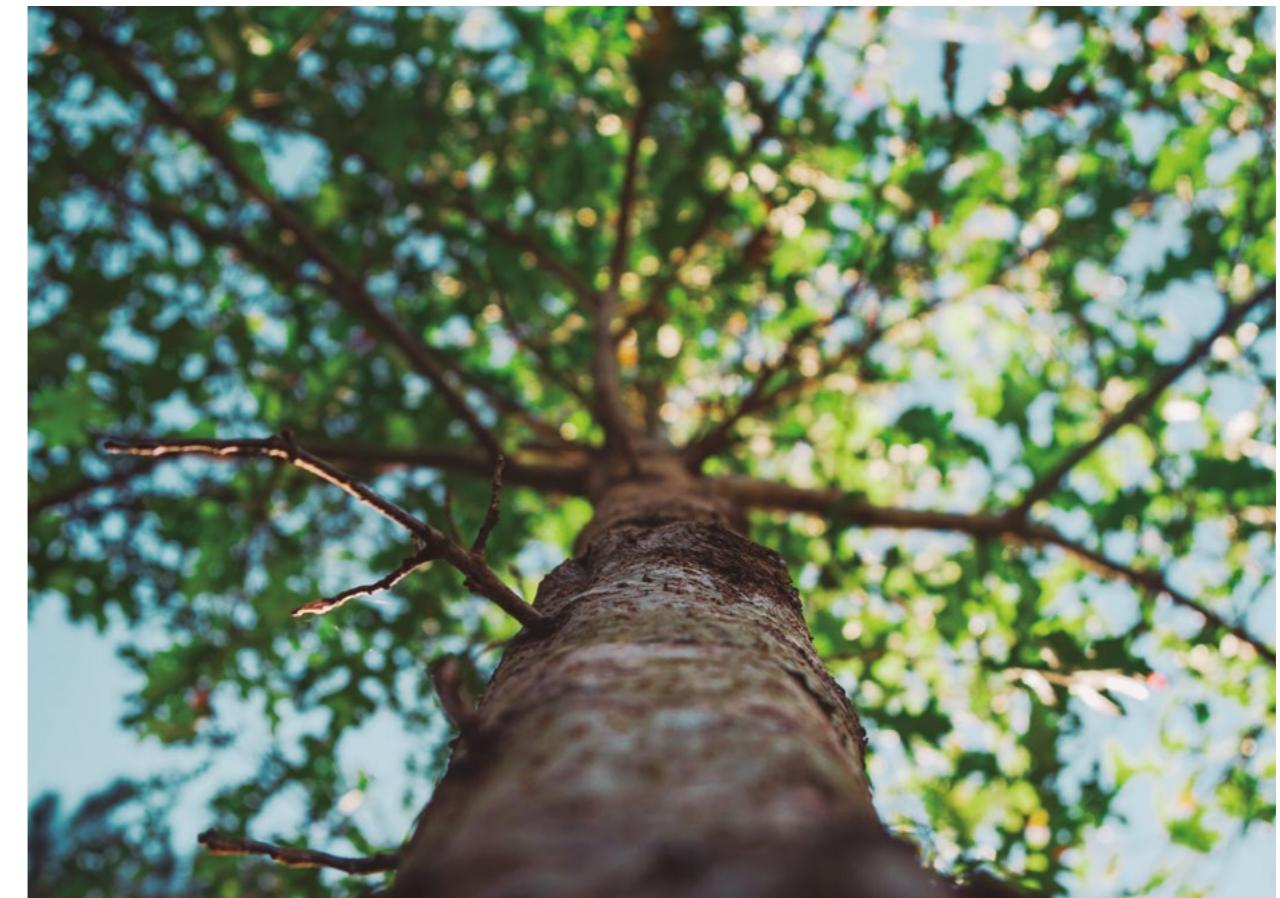
## Introducción

Esta **Guía para la adaptación al cambio climático y resiliencia de la Infraestructura Verde en España** es un producto del proyecto ForesteCCo cuyo objetivo es investigar el impacto del cambio climático en las principales especies forestales de la Península Ibérica y la conservación de su diversidad genética. A partir de los conocimientos generados en este proyecto, esta guía ofrece recomendaciones prácticas para integrar la adaptación al cambio climático y la resiliencia en la planificación y gestión de la infraestructura verde (IFV).

El **cambio climático** es una de las principales amenazas para la biodiversidad, con impactos a distintos niveles, desde los genes hasta los biomas (Hlásny *et al.*, 2021). Las especies vegetales muestran fuertes correlaciones con el clima y otras condiciones biofísicas del medio, por lo que cualquier alteración en estos factores puede provocar una reconfiguración de su distribución geográfica (Hampe & Petit 2005; García-Valdés *et al.*, 2013).

El cambio climático en la cuenca mediterránea se caracteriza por un aumento de las temperaturas y por una mayor frecuencia e intensidad de los períodos de sequía y las olas de calor (IPCC, 2022). Estas nuevas condiciones, junto a otros factores socioeconómicos, contribuyen a alterar la estructura y la composición de las masas forestales. Como resultado, estas masas forestales aumentan su vulnerabilidad frente a riesgos bióticos (p.e., plagas) y abióticos (p.e., incendios forestales) y sus funciones ecosistémicas son alteradas (Rebollo *et al.*, 2024, FAO, 2025). La respuesta de las especies frente a la crisis climática puede ser la extinción local, la migración y la adaptación a las nuevas condiciones (Hlásny *et al.*, 2021; Leites & García, 2023). Las principales hipótesis sobre la migración de especies proponen que estas tienden a mantener sus nichos climáticos a lo largo de gradientes espaciales, siendo esta regularidad más predecible para la temperatura que para la precipitación. En este marco, se plantean tres direcciones predominantes de desplazamiento:

- (1) hacia latitudes más altas;
- (2) hacia mayores elevaciones; y
- (3) hacia mayores profundidades en el caso de las especies acuáticas (Rubenstein *et al.*, 2024).



El [Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático \(PNACC\) 2021-2030](#) reconoce la importancia de la variabilidad genética y su relación con la adaptación de las especies forestales. Sin embargo, la mayoría de los ensayos disponibles no fueron diseñados con un enfoque de adaptación al cambio climático, lo que limita su utilidad a este respecto (Felicísimo *et al.*, 2011). Además, algunas de las herramientas disponibles tienen limitaciones tales como unos escenarios climáticos poco fiables o desactualizados, errores sistemáticos y mapas de distribución elaborados para pocas especies, lo que limita su uso en proyectos de restauración ecológica y gestión del territorio (Passos *et al.*, 2024). Los escenarios de clima futuro deben cumplir una serie de requerimientos científico-técnicos con el fin de que las herramientas sean lo más rigurosas posibles y puedan utilizarse en estudios de evaluación de impacto y adaptación al cambio climático. Para ello, deben usarse los modelos climáticos más recientes, información a escala local y con resolución temporal diaria y con el manejo adecuado de las incertidumbres y estudios completos de verificación y validación; Ribalaygua *et al.*, 2013). En ForesteCCo se han cumplido todos estos requerimientos generando para cada especie o grupo genético 120 proyecciones de clima futuro, en una rejilla de 1 Km x 1 Km, a escala diaria, producto de 10 modelos climáticos desarrollados en el CMIP6 del 6º Informe del IPCC), cuatro trayectorias socioeconómicas

compartidas (SSPs por sus siglas en inglés de *Shared Socioeconomic Pathways*) y tres períodos futuros hasta final de siglo además del periodo histórico. Dichos modelos fueron corregidos y verificados mediante una metodología avanzada de *downscaling* estadístico. Trabajar con esta variedad de modelos y trayectorias permite un manejo adecuado de las incertidumbres.

La diversidad genética es clave para aumentar la resiliencia de las especies y los ecosistemas. La planificación de la infraestructura verde debería incluir no solo especies de otras latitudes o altitudes sino también distintas procedencias de las especies ya existentes en un paisaje o región (Voltas, 2023). Ello se justifica porque cuanto mayor sea la diversidad genética de las especies, mayor será su capacidad de adaptación a los cambios ambientales y mayor será la resiliencia de los ecosistemas. Este proyecto se ha enfocado en el estudio de las condiciones locales a las que están adaptadas las distintas variedades genéticas de las especies forestales y en la búsqueda de los lugares donde se darán esas condiciones en el futuro para poder planificar una IFV resiliente al cambio climático.

## Infraestructura verde y restauración ecológica

La [Estrategia Nacional de Infraestructura Verde y de la Conectividad y Restauración Ecológicas](#) define la infraestructura verde como “una red ecológicamente coherente y estratégicamente planificada de zonas naturales y seminaturales y de otros elementos ambientales, diseñada y gestionada para la conservación de los ecosistemas y el mantenimiento de los servicios que nos provee”. El cambio climático amenaza la conectividad ecológica porque genera nuevas barreras que dificultan los flujos biofísicos y provoca la alteración de los hábitats por incendios, inundaciones, plagas o procesos de desertificación, entre otros factores (MITERD, 2021; Muluneh, 2021). Garantizar la conservación de la IFV es clave para adaptar los ecosistemas naturales y las ciudades al nuevo contexto climático, aumentando su resiliencia y reduciendo la vulnerabilidad ante riesgos naturales (MITERD, 2021; Ramyar *et al.*, 2021).

La restauración ecológica es una solución basada en la naturaleza (IUCN, 2020) para revertir la degradación de los ecosistemas y mejorar la conectividad ecológica. Para que sea efectiva a largo plazo, debe integrar los impactos del cambio climático en su diseño y aplicación (Chazdon & Brancalion, 2019). Simonson *et al.* (2021) proponen siete recomendaciones para asegurar la resiliencia climática en proyectos de restauración, entre las que se incluye considerar las incertidumbres del cambio climático al establecer objetivos de restauración, seleccionar sitios basándose en la comprensión de los cambios proyectados en el clima y la conectividad o considerar la distribución futura y la idoneidad de las especies y los ecosistemas seleccionados (**Figura 1**).



**Figura 1.** Siete aspectos clave en los que el cambio climático debe ser considerado durante el diseño e implementación de proyectos de restauración ecológica. Este marco contribuye a la resiliencia climática de los proyectos. Fuente: adaptado de Simonson *et al.*, 2021.

## El Proyecto ForesteCCo

Los planes de gestión y las estrategias de conservación suelen basarse en datos espaciales para comprender y modelar los patrones de biodiversidad y otras funcionalidades del ecosistema a lo largo del espacio y del tiempo (Goicoechea et al., 2025). Anticipar el comportamiento de las especies en los escenarios climáticos y temporales futuros es clave para identificar y priorizar zonas estratégicas para la adaptación de la IFV.

En este contexto, resulta esencial contar con herramientas adaptativas que integren el conocimiento científico, la gestión del territorio y las proyecciones climáticas. De este modo, los gestores podrán planificar estrategias de conservación y restauración de la IFV de una forma eficiente y a largo plazo.

El proyecto ForesteCCo se ha centrado en mejorar el conocimiento sobre el cambio climático y su impacto en las 44 especies forestales más relevantes para la restauración ecológica en España peninsular e Islas Baleares, así como en los grupos ecológicos y genéticos de doce de estas especies para su uso como materiales forestales de reproducción (**Tabla 1**). Además, buscó comprender mejor la fragmentación y la conectividad ecológica y su relación con la conservación de la biodiversidad.



**Tabla 1.** Lista de especies y grupos genéticos del proyecto ForesteCCo. Las celdas en azul oscuro representan especies con regiones de procedencia (RPs) y Materiales de Base (MBs) identificados y/o seleccionados; las celdas en azul claro representan especies con RPs, MBs y unidades de conservación genética (UCGs) de recursos Genéticos Forestales (RGF); y las celdas en rosa representan especies con RPs, MBs, UCGs y delimitación de grupos ecológicos y/o genéticos (GGs).

Modelización por especies	Modelización por grupos genéticos
<i>Abies alba</i> Mill.	<i>Pinus uncinata</i> Mill.
<i>Abies pinsapo</i> Boiss.	<i>Populus alba</i> L.
<i>Acer platanoides</i> L.	<i>Populus nigra</i> L.
<i>Acer pseudoplatanus</i> L.	<i>Populus tremula</i> L.
<i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaertn.	<i>Prunus avium</i> L.
<i>Arbutus unedo</i> L.	<i>Quercus canariensis</i> Willd.
<i>Betula pendula</i> Roth	<i>Quercus coccifera</i> L.
<i>Betula pubescens</i> Ehrh.	<i>Quercus pubescens</i> Willd.
<i>Castanea sativa</i> Mill.	<i>Sorbus aria</i> Crantz.
<i>Fraxinus angustifolia</i> Vahl.	<i>Sorbus aucuparia</i> L.
<i>Fraxinus excelsior</i> L.	<i>Tamarix gallica</i> L.
<i>Ilex aquifolium</i> L.	<i>Taxus baccata</i> L.
<i>Juglans regia</i> L.	<i>Tilia cordata</i> Mill.
<i>Juniperus communis</i> L.	<i>Tilia platyphyllos</i> Scop.
<i>Juniperus oxycedrus</i> L.	<i>Ulmus glabra</i> Huds.
<i>Juniperus thurifera</i> L.	<i>Ulmus minor</i> Mill.

## 2

# Objetivos

Los objetivos de la guía son:

**Objetivo general:** Mejorar el conocimiento sobre fragmentación y conectividad ecológica y su relación con la conservación de la biodiversidad para la planificación de infraestructura verde en España peninsular e Islas Baleares en el contexto de cambio climático.

Los **objetivos específicos** son:

**OE1.** Identificar las **áreas de alto valor ecológico prioritarias para la conservación de la biodiversidad** basándose en el análisis de fragmentación según los escenarios de clima futuro.

**OE2.** Presentar **directrices técnicas en materia de IFV** necesarias para mantener o restaurar la conectividad entre las áreas identificadas, integrando las estrategias de adaptación al cambio climático por parte de las administraciones públicas y de otras entidades relacionadas con la gestión de la IFV.

**OE3.** Ilustrar estrategias de gestión de la IFV y de la conectividad mediante **casos de éxito**, incorporando una visión holística y las perspectivas de género y edad.

## 3

# Políticas y marco normativo

Las políticas y el marco normativo global, europeo y nacional están alineados con los objetivos de esta guía. A nivel global, destacan los Objetivos del Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas ([Agenda 2030](#)), la [Década de las Naciones Unidas sobre la Restauración de los Ecosistemas \(2021-2030\)](#) y el [Marco Mundial de Biodiversidad](#) (GBF) para 2030. Dos objetivos relevantes del GBF son proteger al menos el 30% de las tierras, aguas continentales, zonas costeras y océanos y restaurar completamente (o estar en proceso de conseguirlo) el 30% de los ecosistemas terrestres, continentales, costeros y marinos degradados del planeta.

A nivel europeo destacan las estrategias de la [Unión Europea sobre Biodiversidad para 2030](#), la [Nueva Estrategia en favor de los bosques para 2030](#) y el [Reglamento de la UE de Restauración de la Naturaleza](#), aprobado en julio de 2024 (alineadas, a su vez, con el [Pacto Verde Europeo 2020](#)). Este Reglamento establece en su artículo 12 “Restauración de los ecosistemas forestales” que los Estados miembros deben lograr una tendencia creciente en al menos seis de siete indicadores relacionados con la salud de los bosques y su biodiversidad. Entre estos indicadores se incluyen (1) la conectividad forestal; (2) el porcentaje de bosques dominados por especies arbóreas autóctonas; y (3) la diversidad de especies arbóreas. El incumplimiento de estos indicadores solo será admisible en casos de fuerza mayor o por transformaciones inevitables del hábitat derivadas directamente del cambio climático. Por su parte, el artículo 13 establece el compromiso de plantar 3.000 millones de árboles adicionales, acción que se nutre, entre otros, de los objetivos del artículo 12.

A nivel nacional, destacan el [Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático](#) (PNACC 2021-2030), la [Estrategia Nacional de Infraestructura Verde, Conectividad y Restauración Ecológicas](#) (ENIVCRE, 2021) y la [Estrategia Forestal Española](#) (Horizonte 2050), instrumentos clave para integrar la adaptación, la conservación de la biodiversidad y la restauración ecológica en las políticas de planificación y gestión territorial.

En este contexto normativo y estratégico, esta guía pretende aportar criterios prácticos para orientar restauraciones que sean coherentes con los compromisos de los que España forma parte.

## 4

# Metodología general

Para alcanzar los diferentes objetivos se ha seguido la siguiente metodología general:

**OE1. Identificar las áreas clave de alto valor ecológico prioritarias para la conservación de la biodiversidad basándose en resultados del análisis de fragmentación según los escenarios de clima futuro.**

Se siguieron cuatro pasos principales:

1. Recopilación y producción de escenarios locales de clima futuro para España peninsular e Islas Baleares.
2. Desarrollo de Modelos de Distribución de Especies (MDE) forestales, delimitando para 12 de estas especies un número variable de grupos genéticos con posibles respuestas adaptativas diferenciadas frente al cambio climático.
3. Evaluación del impacto del cambio climático sobre los hábitats y producción de indicadores de fragmentación basándose en los mapas de los MDE generados previamente.
4. Identificación de las áreas clave de alto valor ecológico prioritarias para la conservación de la biodiversidad.

Los detalles metodológicos se presentan en el [Anexo I](#).

**OE2. Presentar directrices técnicas en materia de IFV necesarias para mantener o restaurar la conectividad entre las áreas identificadas, integrando las estrategias de adaptación al cambio climático por parte de las administraciones y las entidades públicas o privadas relacionadas con la gestión de la IFV.**

Para alcanzar este objetivo se llevó a cabo una revisión documental y técnica en tres fases complementarias:

1. Análisis de políticas y estrategias institucionales. Se revisaron las principales estrategias y planes de adaptación al cambio climático y gestión de IFV impulsados

por administraciones públicas a distintas escalas, con el fin de identificar criterios y medidas aplicables a la gestión de la IFV y la conectividad ecológica.

2. Revisión bibliográfica. Se consultó la literatura científica y técnica relevante sobre conectividad ecológica, gestión forestal sostenible y adaptación al cambio climático.
3. Integración de experiencias previas. Se analizaron informes técnicos, proyectos y documentos elaborados previamente por FIRE que compilan experiencias o metodologías replicables.

**OE3. Ilustrar estrategias de gestión de la IFV y de la conectividad mediante casos de éxito, incorporando una visión holística y las perspectivas de género y edad.**

Para alcanzar este objetivo se realizó una revisión documental y técnica orientada a la identificación y análisis de casos de éxito representativos. El proceso se desarrolló en cuatro fases complementarias:

1. Búsqueda sistemática de información. Se efectuaron búsquedas sistemáticas en bases de datos, motores de búsqueda y portales especializados utilizando palabras clave como “proyectos”, “cambio climático”, “conectividad ecológica” e “infraestructura verde”, con el fin de identificar experiencias relevantes en el ámbito nacional.
2. Exploración de convocatorias y programas de referencia. Se llevaron a cabo búsquedas específicas en repositorios de proyectos financiados por programas y entidades clave, como la Fundación Biodiversidad y el Programa LIFE, con énfasis en iniciativas relacionadas directamente con el proyecto ForesteCCo.
3. Identificación de proyectos con enfoque de género y edad. Se revisó la información disponible para evaluar la integración de las perspectivas de género y edad en los proyectos preseleccionados en los dos puntos anteriores. Adicionalmente, se consultó la [Guía para incluir la perspectiva de género en proyectos de entidades colaboradoras de la Fundación Biodiversidad](#), con el fin de integrar otras experiencias que consideraran la participación equitativa en la gestión de la IFV.
4. Elaboración de una base de datos detallada de los proyectos identificados. Se recopiló y sistematizó toda la información relevante sobre cada iniciativa considerada de interés, incluyendo su descripción y aspectos relacionados con la participación de mujeres y jóvenes. Para evaluar este último aspecto, se diseñó un sistema de puntuación que asignó a cada proyecto un valor en función de sus contribuciones a la inclusión y participación de estos dos grupos. Esta base de datos permitió organizar los casos de éxito de forma estructurada y facilitar su análisis comparativo, sirviendo de base para la selección de los tres casos presentados en esta guía.

## 5

# Identificación de áreas prioritarias para conservar y/o restaurar la conectividad

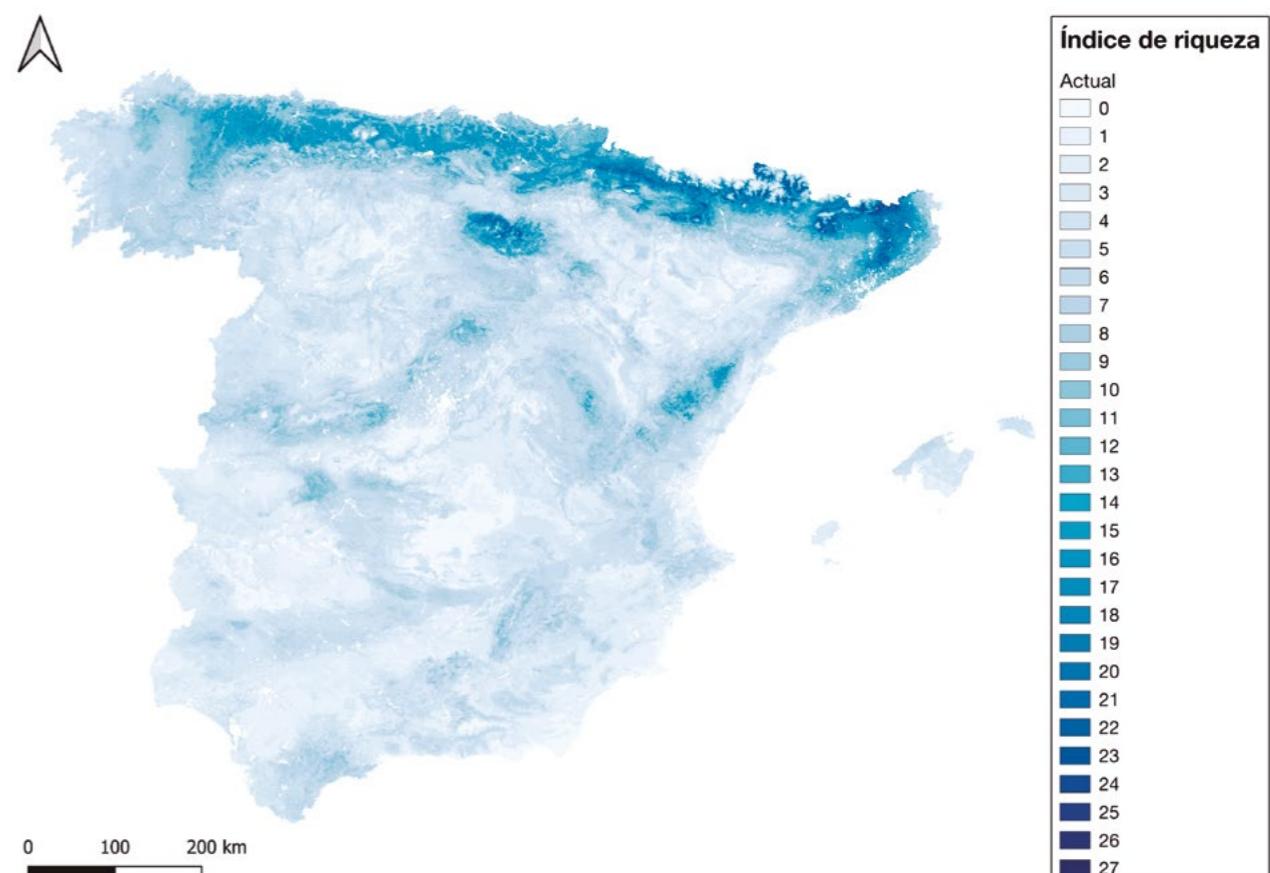
En este apartado se presentan los resultados de la identificación de zonas prioritarias para conservar y restaurar la conectividad ecológica en España peninsular y Baleares en el contexto del cambio climático. El cambio climático está modificando de manera progresiva la viabilidad de los actuales usos del suelo, impulsando transiciones entre sistemas agrícolas, pastizales, matorrales y forestales arbolados. En las próximas décadas, el abandono de tierras agrícolas y de pastos podría aumentar (Gallardo *et al.*, 2023), especialmente en aquellas zonas donde la productividad se vea comprometida por el aumento de las temperaturas, la reducción de la disponibilidad hídrica o la mayor frecuencia de eventos extremos. Paralelamente, algunos sistemas forestales existentes podrían perder parte de su funcionalidad ecológica, ya sea por un incremento del riesgo de incendios (Aparicio *et al.*, 2022), por el decaimiento asociado al estrés hídrico o por la baja resiliencia de determinadas especies ante las nuevas condiciones climáticas (Ogaya *et al.*, 2021).

En este contexto, los cambios que se observan en los mapas actuales y en el escenario futuro adquieren una relevancia estratégica, al representar una oportunidad para favorecer la conectividad ecológica y la restauración del paisaje. La conversión progresiva de áreas agrícolas de baja productividad en mosaicos agroforestales o en formaciones de vegetación leñosa puede actuar como un puente entre masas forestales fragmentadas, contribuyendo a la adaptación del territorio al cambio climático y a la conservación de la biodiversidad en escenarios de alta presión ambiental (Edris *et al.*, 2025).

## 5.1. Áreas relevantes de biodiversidad

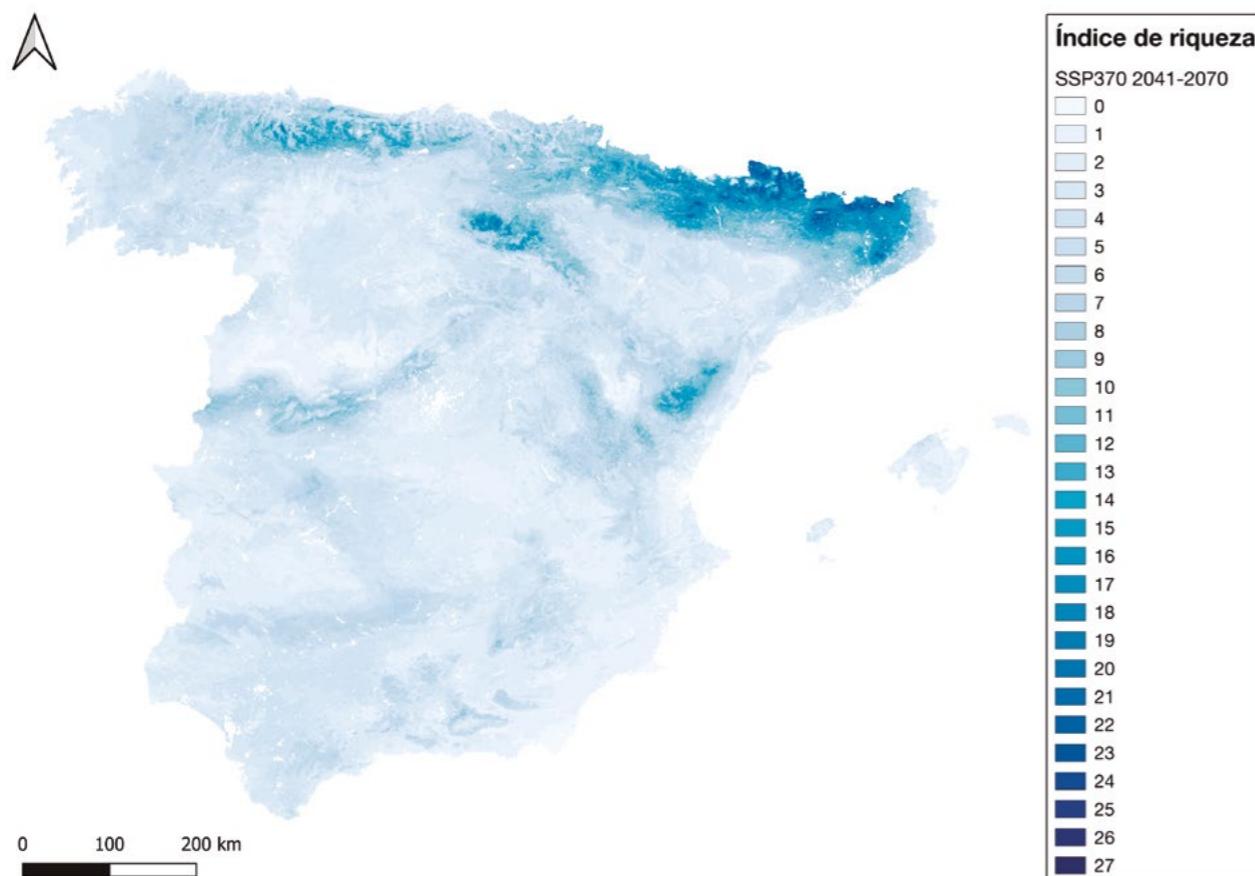
Como se describe en la metodología ([Anexo I](#)), se identificaron las áreas relevantes de biodiversidad actuales y futuras (eje de cambio 2041-2070 SSP 3-7.0.) mediante los índices de riqueza, rareza y un índice combinado de ambos de las 44 especies y los grupos genéticos de 12 de estas especies evaluados en este proyecto.

Los mapas de las [Figuras 2 y 3](#) muestran que los valores de **riqueza máxima** son similares en la actualidad y en el escenario futuro de estudio, concentrándose principalmente en zonas montañosas como la cordillera Cantábrica y los Pirineos, seguida de los sistemas Ibérico y Central. Sin embargo, se observa que algunas áreas del norte de España experimentarán una disminución en la riqueza de especies en el futuro.



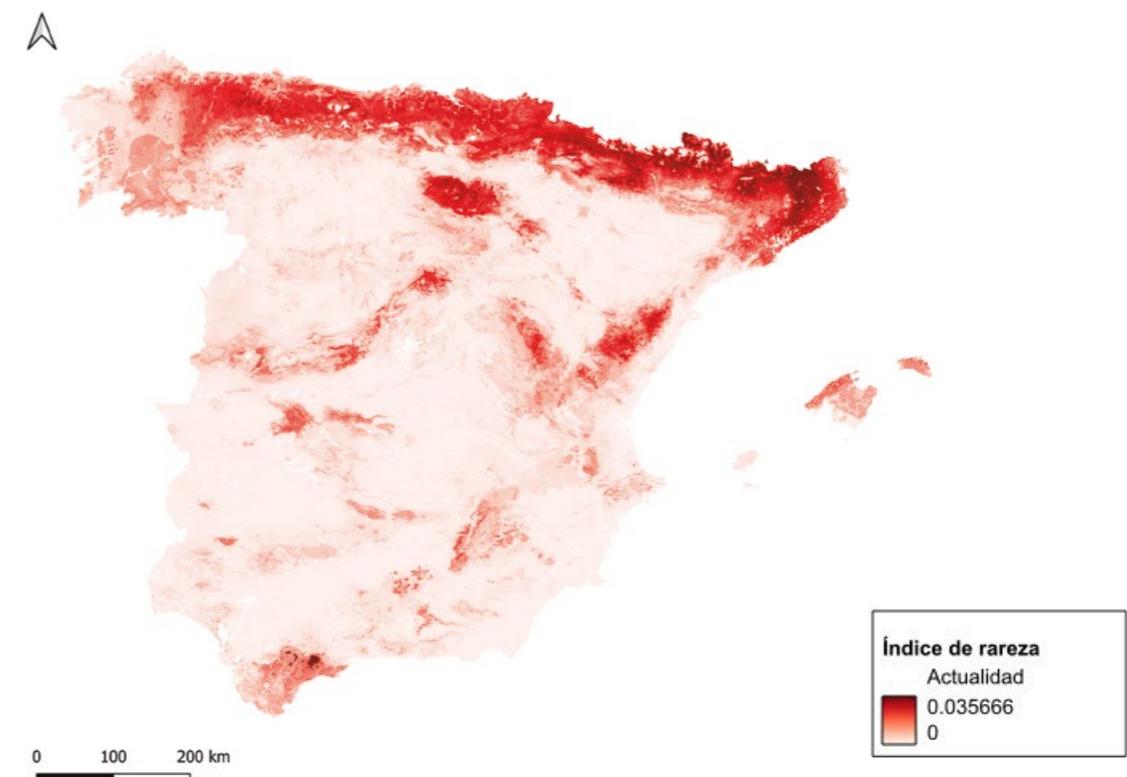
**Figura 2.** Mapa de la riqueza actual de especies y grupos genéticos según los modelos de distribución del proyecto ForesteCCo.

18

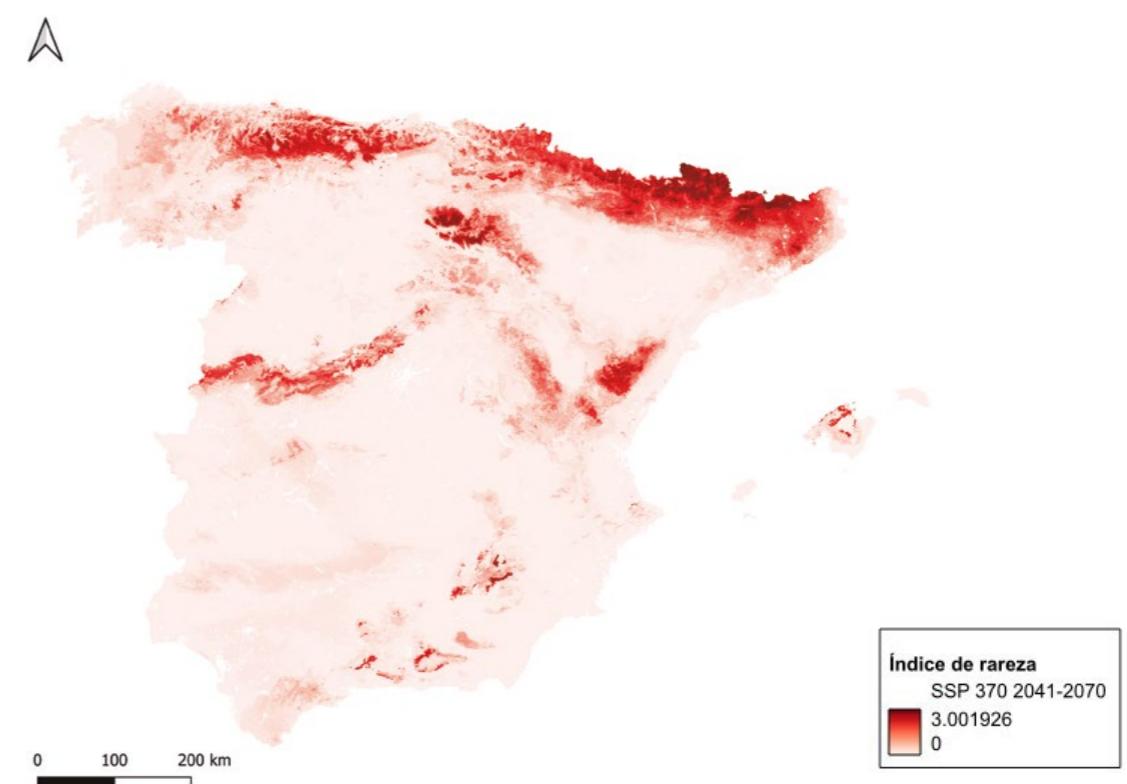


**Figura 3.** Mapa de la riqueza en el eje de cambio 2041-2070 SSP 3-7.0 de especies y grupos genéticos según los modelos de distribución del proyecto ForesteCCo.

Las **Figuras 4 y 5** muestran que las “zonas calientes” que concentran un mayor número de especies y grupos genéticos raros coinciden con las áreas de mayor riqueza de especies. El valor máximo del índice en el escenario futuro es más de 100 veces superior al del escenario actual. Esta diferencia puede explicarse porque, en el escenario futuro, predeciblemente las especies reducirán su área de distribución, es decir, “se rarifican” (disminuye el número de celdas donde una especie está presente).



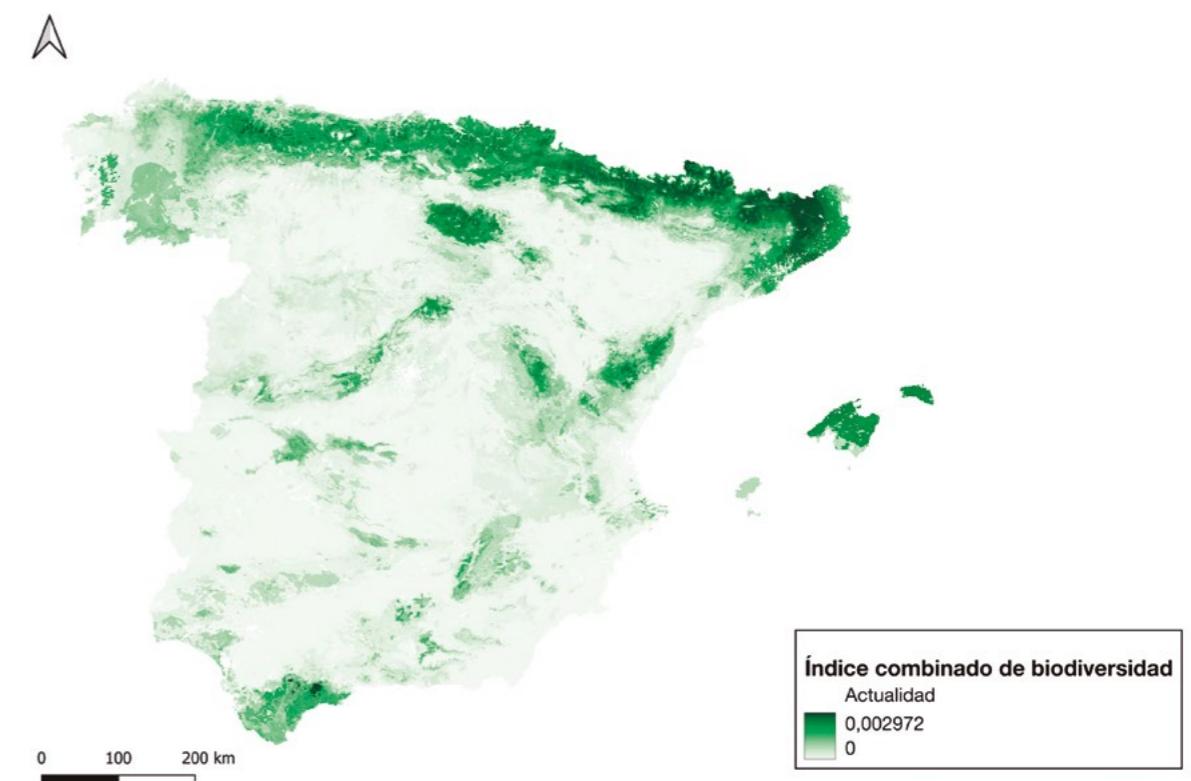
**Figura 4.** Mapa de rareza actual de las especies y grupos genéticos según los modelos de distribución del proyecto ForesteCCo.



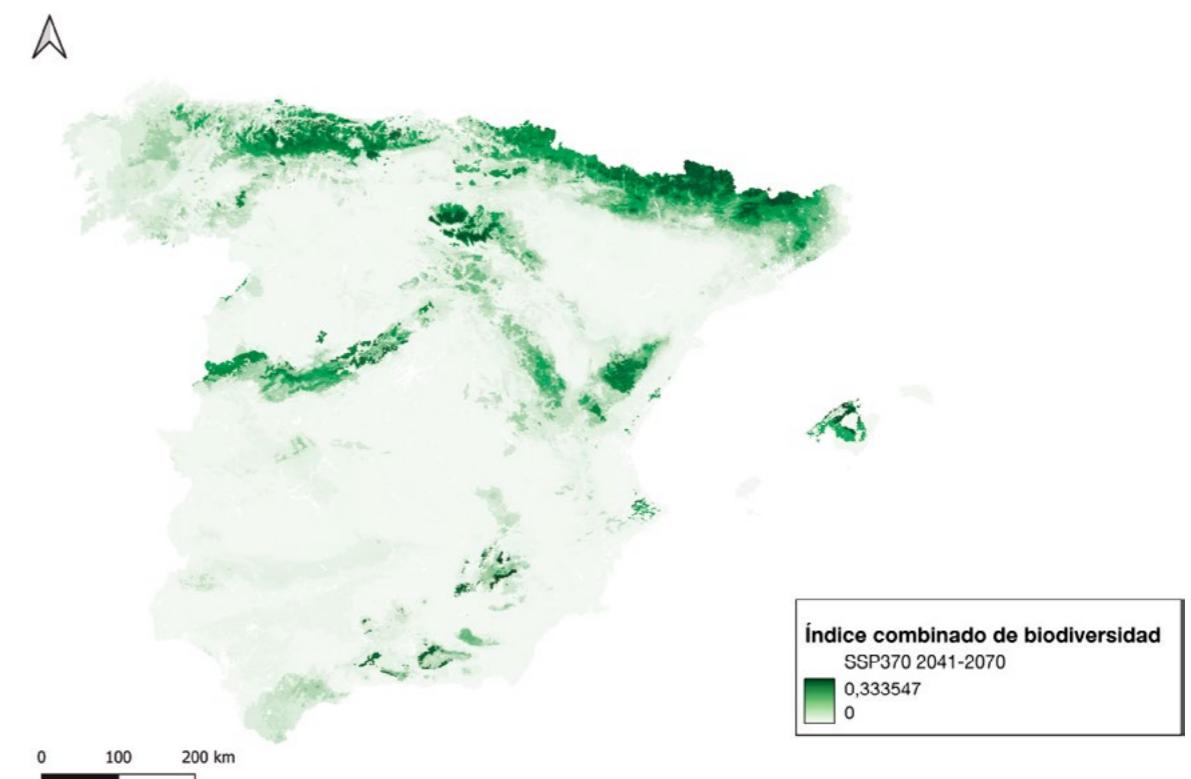
**Figura 5.** Mapa de rareza en el eje de cambio 2041-2070 SSP 3-7.0 de las especies y grupos genéticos según los modelos de distribución del proyecto ForesteCCo.



El índice combinado de biodiversidad (ICB) refleja tendencias similares a las observadas en los índices de riqueza y rareza, ya que integra ambos índices y estos, a su vez, presentan unas distribuciones geográficas similares en el área de estudio (**Figuras 6 y 7**). Las áreas más relevantes para la biodiversidad se concentran, tanto en el escenario actual como en el escenario futuro, en zonas montañosas, principalmente en los Pirineos, la Cordillera Cantábrica y los sistemas Ibérico, Central y Bético, así como en Mallorca y Menorca. Al igual que ocurre con la rareza, los valores máximos del ICB son significativamente mayores en el escenario futuro, lo que subraya la importancia de estas áreas como potenciales refugios climáticos.

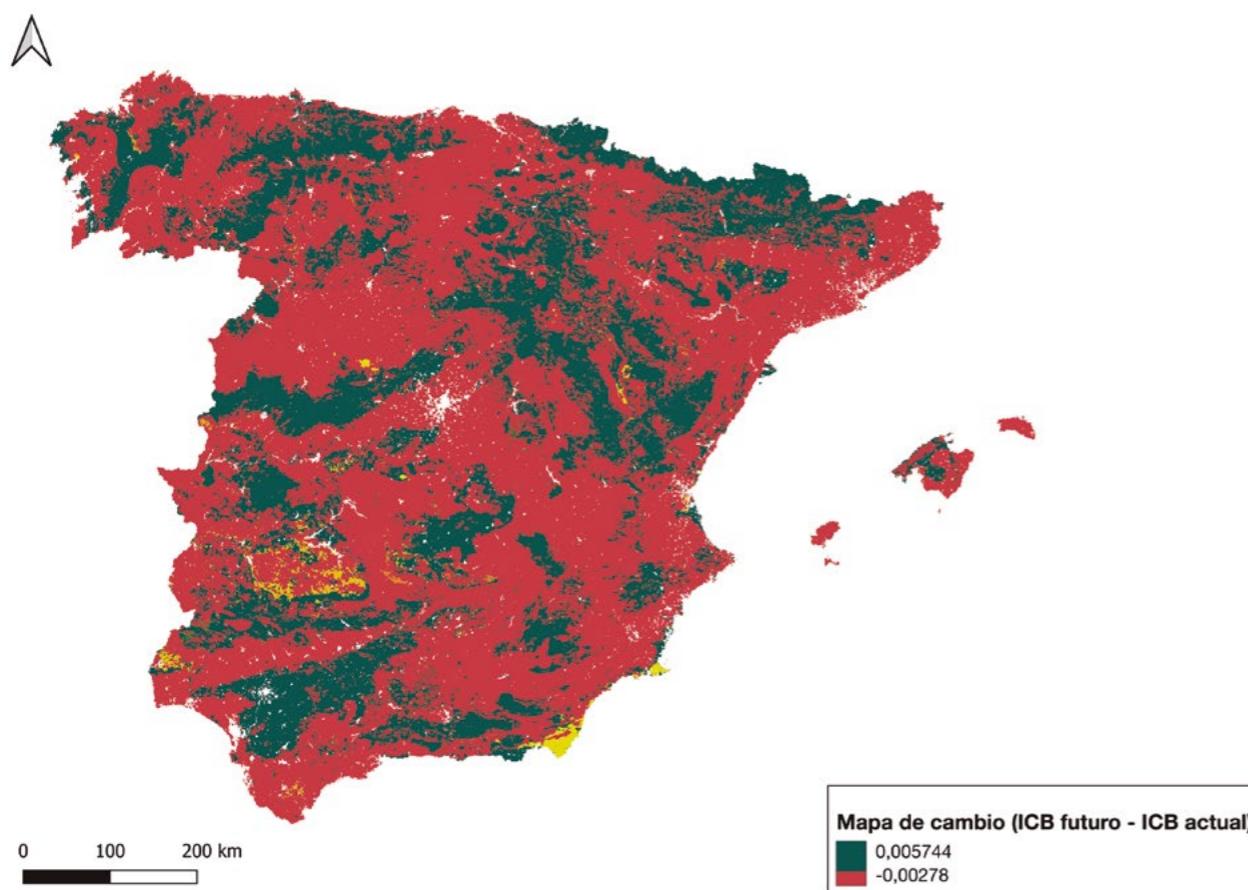


**Figura 6.** Mapa del índice combinado de biodiversidad actual de las especies y grupos genéticos según los modelos de distribución del proyecto ForesteCCo.



**Figura 7.** Mapa del índice combinado de biodiversidad en el eje de cambio 2041-2070 SSP 3-7.0 de las especies y grupos genéticos según los modelos de distribución del proyecto ForesteCCo.

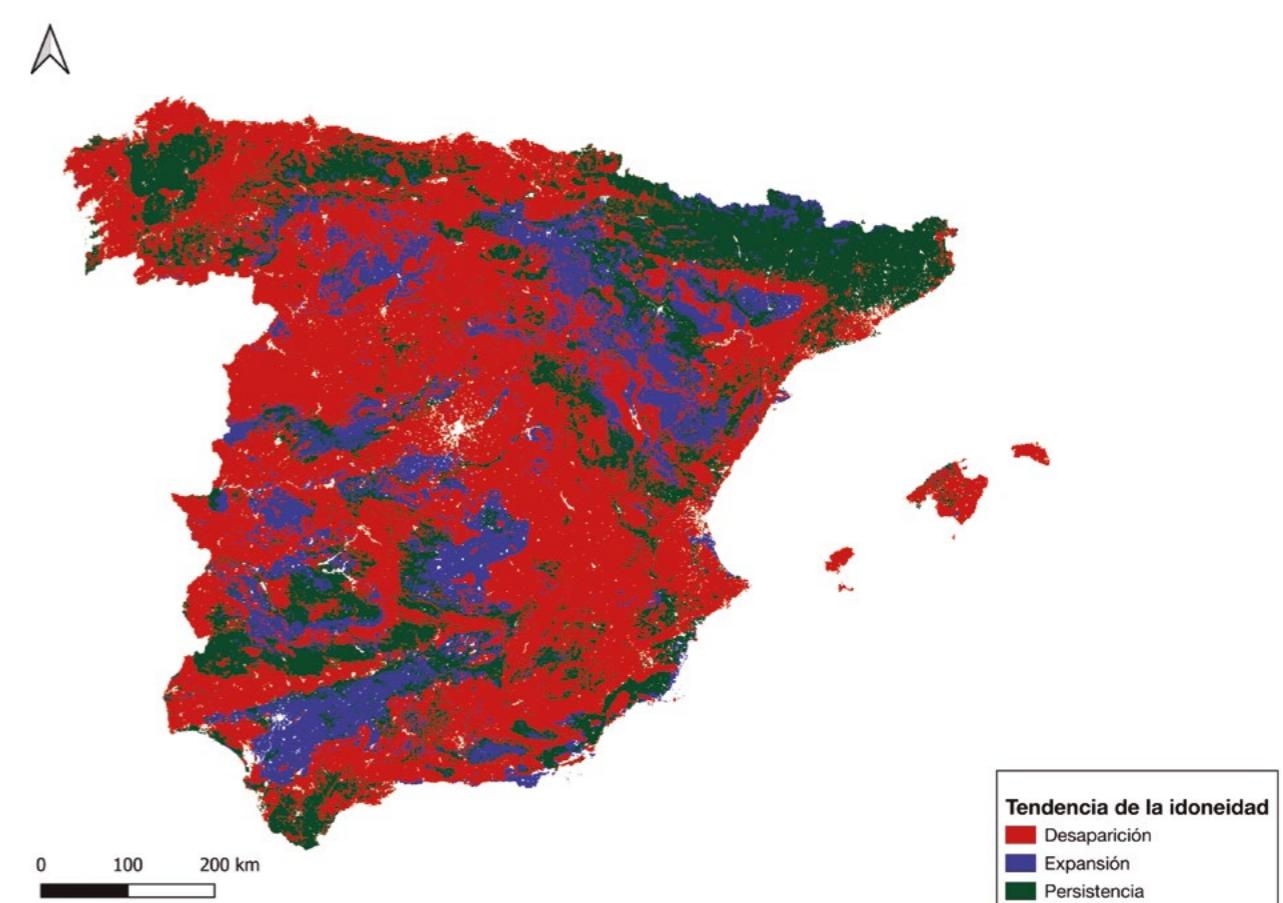
La **Figura 8** muestra el cambio del índice combinado de biodiversidad (ICB) entre los escenarios actual y futuro. En gran parte del territorio, el ICB disminuirá en el futuro respecto a la situación actual (zonas rojas del mapa). Sin embargo, el ICB aumentará en las áreas que ya presentan los valores más altos de ICB (zonas verdes), reforzando su papel como potenciales refugios climáticos, como se explicó anteriormente. Algunas de estas zonas no presentan actualmente un uso forestal, como es el caso del Valle del Guadalquivir, aunque esta situación podría cambiar en el futuro hacia un uso forestal, especialmente si la viabilidad de los cultivos, en particular los de secano, continúa disminuyendo.



**Figura 8.** Mapa de cambio del índice combinado de biodiversidad entre los escenarios actual y futuro (2041-2070, SSP 3-7.0). El color rojo indica las zonas donde el ICB es mayor en la actualidad que en el futuro, el verde donde el ICB futuro es mayor que el actual y el amarillo representa el valor cero, es decir, sin cambios en el ICB.

## 5.2. Priorización de esfuerzos de gestión de la conectividad ecológica y la infraestructura verde

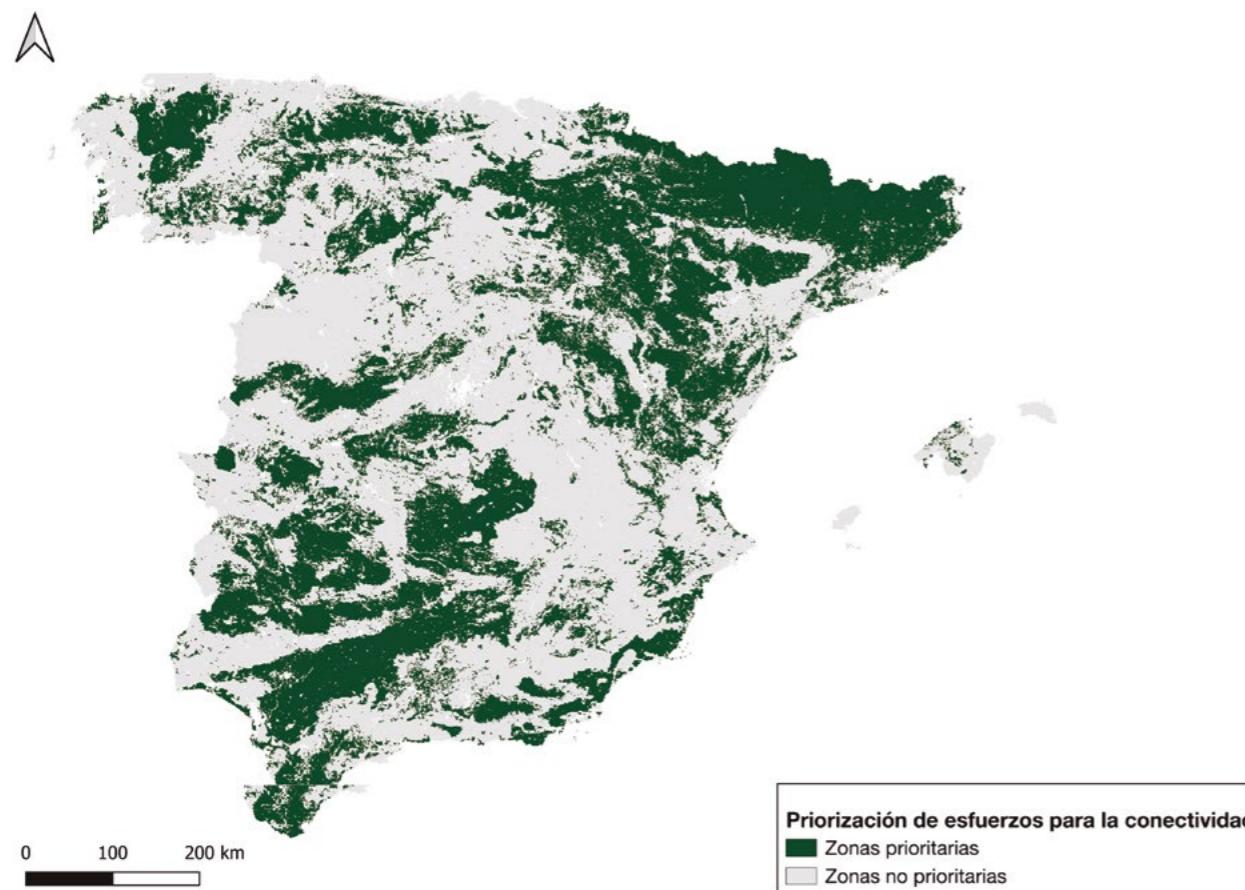
La **Figura 9** muestra los resultados del cálculo de la persistencia, expansión y desaparición del conjunto de las especies y grupos genéticos en el área de estudio. Estos resultados son coherentes con las áreas relevantes de biodiversidad ya que, en general, las especies tienden a persistir o expandirse en las zonas con los valores de índice combinado de biodiversidad más altos y a desaparecer en el resto del territorio.



**Figura 9.** Mapa de la persistencia (verde), expansión (morado) y desaparición (rojo) del conjunto de las especies y grupos genéticos en el escenario estudiado (2041-2070, SSP 3-7.0) respecto al escenario actual.

A partir de este análisis, y siguiendo la metodología descrita, se identifican como zonas prioritarias para la conservación y/o restauración aquellas donde el conjunto de especies y grupos genéticos tienden a persistir o expandirse. Por el contrario, se consideran zonas no prioritarias aquellas donde las especies y grupos genéticos tienden a desaparecer (**Figura 10**). No obstante, en las zonas

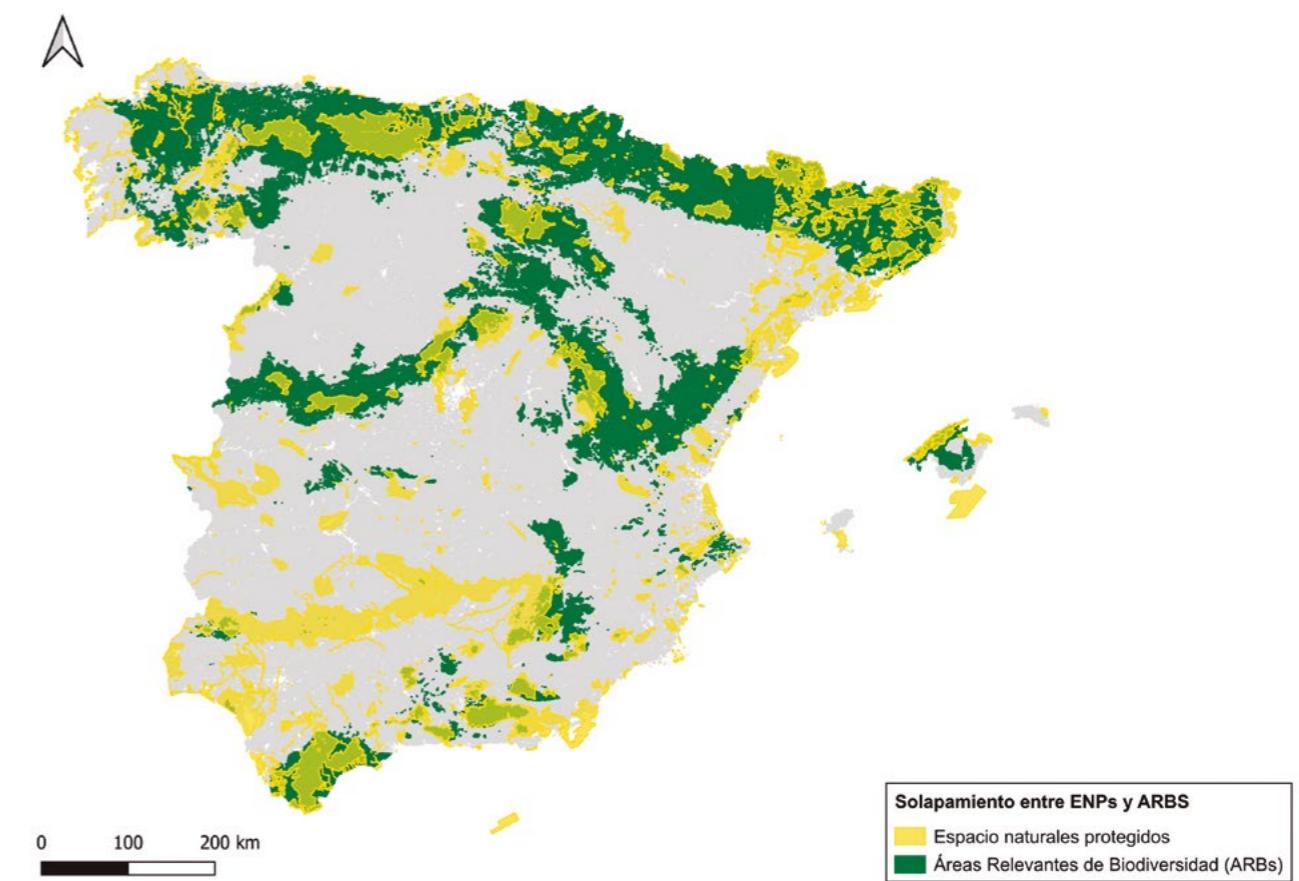
que concentran la “desaparición”, lo que en realidad ocurre es una sustitución de unas especies por otras. Estas áreas pueden ser relevantes desde el punto de vista de la gestión adaptativa, por ejemplo, al seleccionar cuidadosamente las especies en proyectos de restauración y mejora de la infraestructura verde. Al igual que en el caso anterior, es importante señalar que algunas de las zonas de expansión no presentan actualmente un uso forestal. Estas áreas podrían dar lugar a nuevas combinaciones de especies en territorios tradicionalmente agrícolas, donde la viabilidad de los cultivos está cada vez más comprometida, o en hábitats no forestales, como los del Pirineo Central.



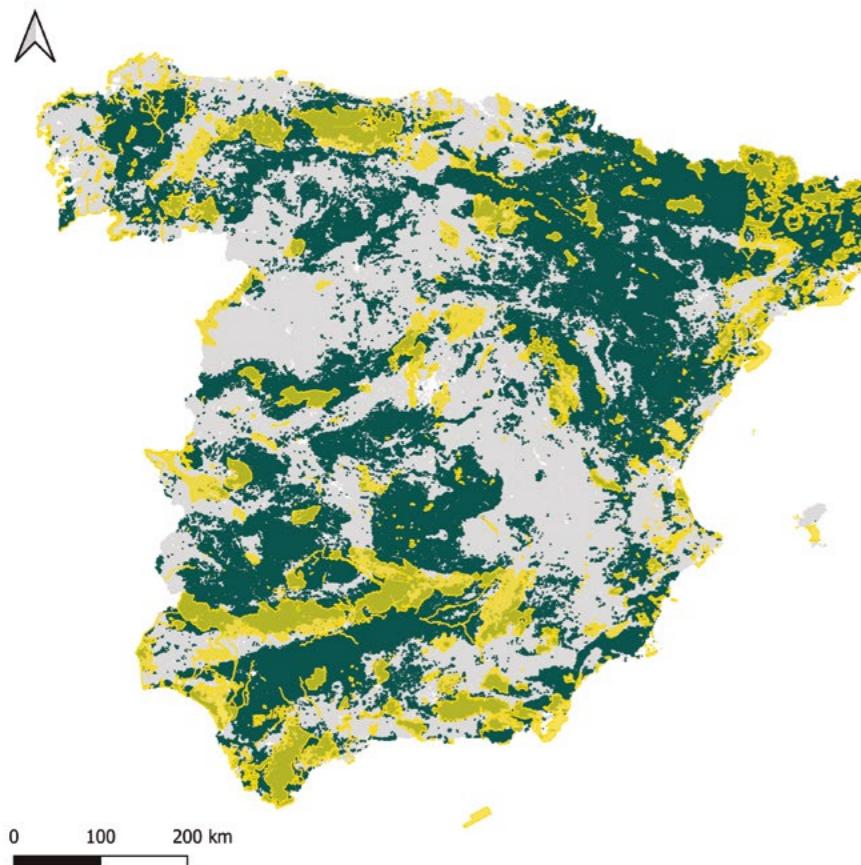
**Figura 10.** Priorización de esfuerzos para la conservación y/o restauración de la conectividad ecológica y la adaptación de la IFV al cambio climático. Las zonas prioritarias (verde oscuro) son aquellas donde el conjunto de especies y grupos genéticos tienden a persistir o expandirse, mientras que las zonas no prioritarias (zonas grises) corresponden a áreas donde la tendencia es a la desaparición.

### 5.3. Solapamiento con los Espacios Naturales Protegidos

El análisis de solapamiento entre las áreas relevantes de biodiversidad (ARBs) y las zonas prioritarias para su conservación o restauración con los espacios naturales protegidos (ENPs, incluyendo la Red Natura 2000) actuales muestra una coincidencia parcial (**Figuras 11 y 12**). En este contexto, la identificación de áreas relevantes y prioritarias puede servir de referencia para la ampliación o creación de nuevos ENPs, destacando especialmente aquellas zonas que, según este estudio, poseen un valor estratégico como potenciales refugios climáticos. Las ARBs se definieron mediante la vectorización de la capa ráster correspondiente al índice combinado de biodiversidad (**Figura 7**), clasificando los valores en cuatro cuantiles con igual número de elementos; el intervalo superior (25% de los valores más altos) se consideró representativo de las ARBs. El solapamiento con los ENPs se calculó sin considerar las Áreas Marinas Protegidas. Hay que tener en cuenta que no todos los ENPs terrestres son zonas forestales, aunque sí de forma mayoritaria. En síntesis, aproximadamente el 40,73% y el 47,68% de los ENPs coinciden con las ARBs (**Figura 11**) y con las zonas prioritarias (**Figura 12**), respectivamente.



**Figura 11.** Solapamiento entre los espacios naturales protegidos actuales (amarillo) y las áreas relevantes de biodiversidad futuras (verde oscuro). El análisis muestra un solapamiento parcial entre ambas zonas.

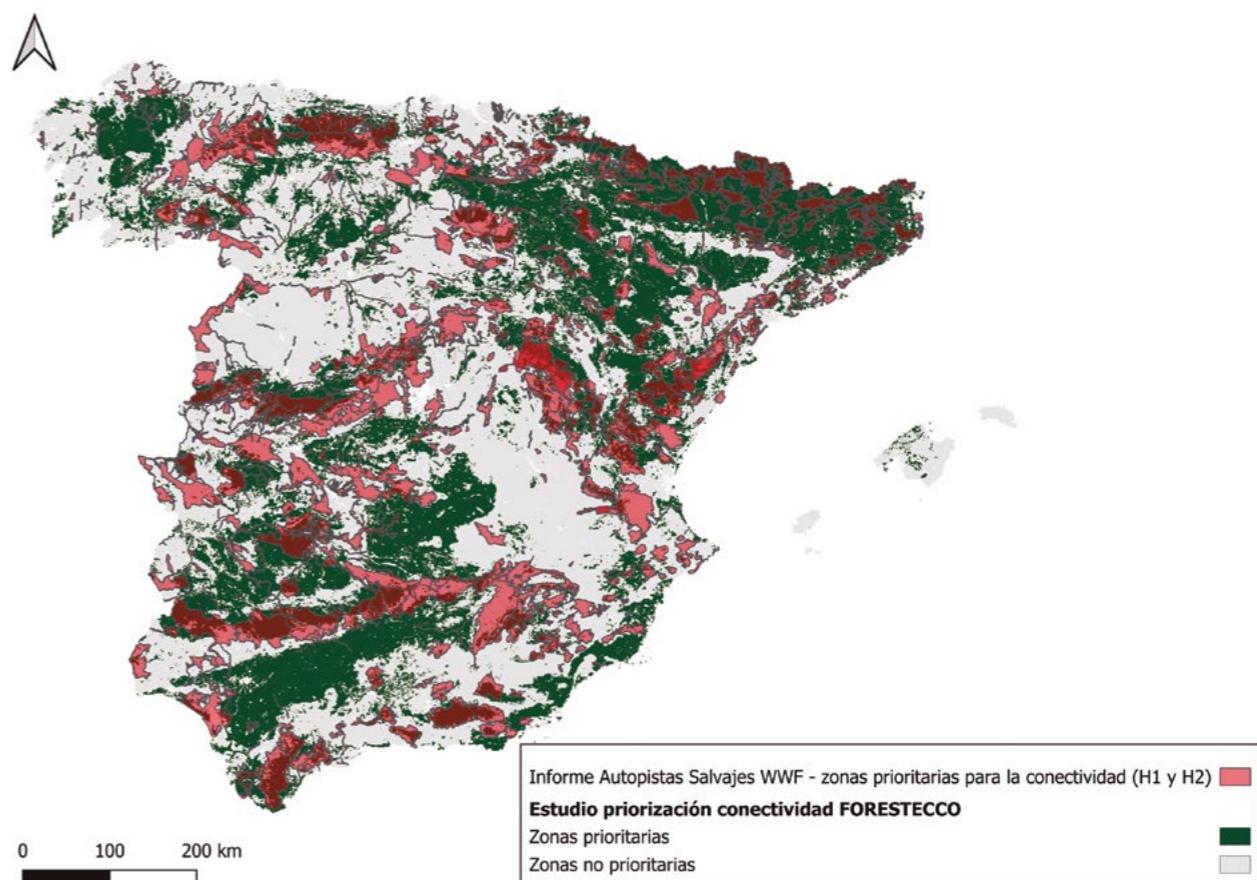


**Figura 12.** Solapamiento entre los espacios naturales protegidos actuales (amarillo) y las zonas prioritarias para la conservación y/o restauración de la conectividad ecológica (verde oscuro).

## 5.4. Contraste del método

El método se contrastó con los resultados del [Informe de Autopistas Salvajes del WWF \(2018\)](#), una propuesta de corredores prioritarios para conectar los espacios forestales de la Red Natura 2000 en España, clasificados como bosque denso, claro y matorral.

El solapamiento espacial entre las zonas prioritarias para la conectividad identificadas en este estudio y las zonas prioritarias de bosque denso y claro de la Red Natura 2000 identificadas en el Informe mencionado se muestra en la **Figura 13**. A pesar de las diferencias metodológicas, principalmente derivadas de que en el Informe del WWF solo se tienen en cuenta las masas forestales de la Red Natura 2000, el análisis de solapamiento espacial determina que un 45% de las zonas prioritarias de dicho informe coinciden con las del estudio de ForesteCCo.



**Figura 13.** Solapamiento de las zonas prioritarias para la conservación y restauración de la conectividad ecológica identificadas por el proyecto ForesteCCo (color verde oscuro) y las zonas de bosque denso y bosque claro prioritarias para la conectividad identificadas por el WWF (color rosa).

## 6

# Directrices técnicas

En este apartado se presentan una serie de directrices técnicas para la implementación *in situ* de actuaciones para conservar, restaurar o mejorar la infraestructura verde y su adaptación al cambio climático. Esta información puede ser relevante tanto para entidades privadas dedicadas a la restauración como para las administraciones públicas, en línea con estrategias nacionales ([Estrategia Nacional de Infraestructura Verde y de la Conectividad y Restauración Ecológicas y PNACC 2021-2030](#); **Tabla 2**), europeas ([Nueva Estrategia de la UE en favor de los Bosques para 2030](#)) e internacionales ([Plan Estratégico de las Naciones Unidas para los Bosques 2017-2030](#)).

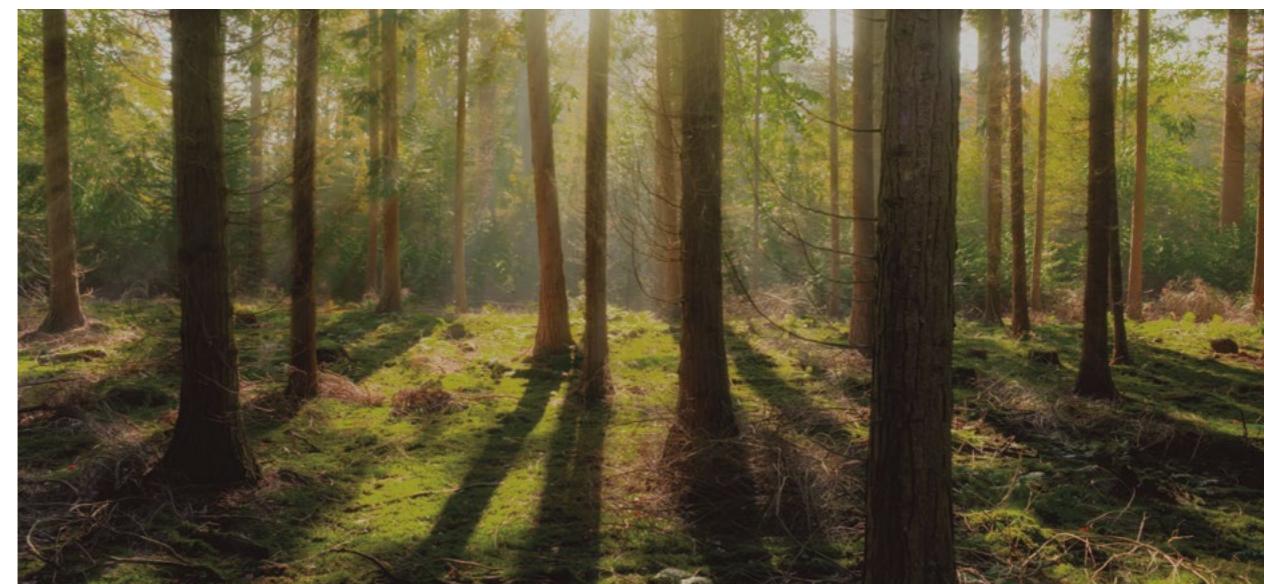
**Tabla 2.** Principales intervenciones recogidas en la línea de acción 4.3. *Mejora de la capacidad adaptativa de la infraestructura verde* del PNACC 2021-2030.

Principales intervenciones para la mejora de la capacidad adaptativa de la infraestructura verde (PNACC 2021-2030)	
Intervenciones (PNACC 2021-2030)	Ejemplos de actuaciones
Orientadas al mantenimiento o la mejora de la provisión de servicios de los ecosistemas, principalmente los de regulación.	Reforestación con especies nativas y adaptadas en zonas degradadas para aumentar el secuestro de carbono y la regulación térmica.
Orientadas a la mejora de la permeabilidad ecológica del territorio y de la conectividad ecológica.	Identificación y gestión de refugios climáticos que faciliten la migración de especies ante el cambio climático.
Orientadas a la reducción de presiones sobre los sistemas naturales (cambios en las prácticas agrícolas, gestión ganadera, gestión forestal, gestión cinegética y piscícola, etc.).	Silvicultura restaurativa que mejore la resiliencia de las masas forestales y reduzca el riesgo de incendios y plagas.
Orientadas a la restauración ecológica de los ecosistemas.	Renaturalización urbana, como creación de nuevas zonas verdes con vegetación autóctona para restablecer servicios ecosistémicos locales.

La identificación de zonas prioritarias es relevante para la planificación estratégica de la infraestructura verde en el contexto del cambio climático a las escalas nacional o autonómica. Por ejemplo, como se ha mencionado, los resultados de este proyecto pueden contribuir a la ampliación de la red actual de ENPs a zonas que serán relevantes para la biodiversidad en el futuro (“refugios climáticos”). También pueden contribuir a canalizar esfuerzos y recursos en la ampliación de corredores ecológicos estratégicos así como la revisión y adaptación de los ya presentes. La restauración de la conectividad ecológica y de la infraestructura verde es clave también a escalas locales, no solo en zonas naturales o seminaturales, sino también en áreas urbanas. De hecho, la ENIVCRE hace hincapié en la necesidad de mejorar la IFV urbana por su impacto sobre grandes grupos de población.

Según Atkinson & Bonser (2020), la restauración ecológica y en particular la restauración forestal puede realizarse de tres maneras:

- **Restauración pasiva o espontánea** basada en la sucesión secundaria tras la eliminación del factor de degradación (por ejemplo, el cese de la actividad agrícola). Corresponde a la regeneración natural según la terminología forestal más aceptada.
- **Restauración asistida**, que combina la estrategia anterior con acciones específicas para acelerar la sucesión (por ejemplo, plantación de islotes forestales y setos multifuncionales que proporcionan lluvia de semillas y atraen dispersores; Rey Benayas *et al.*, 2008, Rey Benayas y Bullock, 2015).
- **Restauración reconstructiva**, una combinación de los enfoques anteriores junto con la introducción de una alta proporción de la biota deseada (por ejemplo, plantaciones extensivas de árboles; Vieco-Martínez *et al.*, 2023).



## 6.1. Restauración pasiva o asistida de la infraestructura verde

Un ejemplo de restauración pasiva se produce tras el abandono de la actividad agrícola en un campo de cultivo, que normalmente producirá un nuevo ecosistema forestal, es decir, la creación de nueva infraestructura verde. Los niveles de recuperación de la biodiversidad, la estructura del bosque y los valores de varios indicadores de funciones ecosistémicas son similares o mayores en los bosques restaurados de forma natural que en las plantaciones forestales (Crouzeilles *et al.*, 2017; Hua *et al.*, 2022). Además, la regeneración natural es una herramienta de restauración que tiene mucho menos costos de implementación y mantenimiento que las plantaciones forestales (Chazdon *et al.*, 2020).

Sin embargo, la regeneración natural puede ser un proceso lento que depende tanto de factores abióticos como bióticos. La ausencia de árboles y arbustos madre que produzcan propágulos (es decir, la ausencia de fuentes semilleras cercanas), a veces unida a la falta de dispersores, limita de manera importante la sucesión secundaria (Pons y Pausas, 2007a; Zamora *et al.*, 2010; Rey Benayas *et al.*, 2025a y 2025b). La depredación de semillas por insectos, roedores y ungulados como el jabalí (*Sus scrofa*) reduce la disponibilidad de semillas, la germinación y la emergencia (Leiva y Fernández-Alés, 2005; Peláez *et al.*, 2024). El herbivorismo sobre plántulas y rebrotes (Garrote *et al.*, 2023), así como la competencia de las hierbas por la luz, el agua y los nutrientes (Cuesta *et al.*, 2010), también impiden o ralentizan la regeneración natural.

Con todo, la regeneración natural puede ser acelerada mediante estrategias de restauración asistida como la plantación de setos, que proporcionan semillas y atraen dispersores (Rey Benayas *et al.*, 2025b). Estos autores concluyeron que (1) la regeneración natural en campos de cultivo abandonados del Mediterráneo continental avanza muy despacio, con apenas entre 2 y 8 nuevos árboles o arbustos reclutados por hectárea y año, incluso después de varias décadas; (2) los setos plantados triplican la regeneración espontánea probablemente porque atraen a los dispersores; y (3) los posaderos para aves favorecen la llegada de especies dispersadas por ellas, aunque sus efectos solo se notan claramente a largo plazo (50 años). En definitiva, cuando existen fuentes de semillas, la regeneración natural puede ser una solución basada en la naturaleza, lenta pero eficaz, para recuperar paisajes agrícolas mediterráneos más diversos y resilientes. La introducción de setos y posaderos acelera este proceso y contribuye a aumentar la biodiversidad de los agroecosistemas.

## 6.2. Restauración reconstructiva de la infraestructura verde

La restauración activa de la IFV abarca tanto prácticas de gestión, por ejemplo, mediante manejo silvícola de las masas forestales, como actuaciones orientadas a la recuperación de la vegetación, principalmente mediante plantaciones. La silvicultura restaurativa constituye una estrategia clave para mitigar y adaptarse a los efectos del cambio climático, al favorecer la transformación de los sistemas forestales simples en ecosistemas más resilientes, reduciendo los efectos derivados de riesgos como las plagas, las sequías prolongadas o los incendios. Por ejemplo, la [Nueva Estrategia de la UE en favor de los Bosques para 2030](#) promueve una silvicultura de cubierta continua y no coetánea, manteniendo cantidades adecuadas de madera muerta y/o creando zonas de hábitats protegidos o reservadas en bosques de producción, que garanticen la existencia de la conservación y la socioeconomía de los bosques. Esta guía se centra especialmente en las directrices técnicas para orientar la conservación y la restauración de la IFV mediante plantaciones. Estas intervenciones pueden adoptar diferentes formatos, como: (1) el establecimiento de infraestructuras verdes lineales; (2) la creación de islotes o islas forestales; o (3) el diseño de zonas verdes multifuncionales (Rey Benayas *et al.*, 2017).

Una vez identificadas las zonas prioritarias para la conservación y restauración de la IFV, es necesario **diseñar la actuación considerando los factores locales de contexto**, incluidos los climáticos, edáficos y espaciales (Mola *et al.*, 2018). Deben considerarse los siguientes factores y elementos:

**Selección de especies:** De manera general, se recomienda seguir los siguientes principios:

- Emplear especies **nativas**.
- Seleccionar especies **adecuadas y los materiales forestales de reproducción (MFR) de aquellos grupos genéticos adaptados a las condiciones climáticas y edáficas locales**, incorporando en lo posible escenarios de **cambio climático**.
- Favorecer la **diversidad**, utilizando MFR de distintas especies con probada aptitud para aumentar su persistencia en los hábitats. El visor del proyecto ForesteCCo es una herramienta de gran utilidad para la toma de decisiones en la selección de especies adaptadas al cambio climático teniendo en cuenta los escenarios de clima futuro a escala local.

**Material de revegetación:** Utilizar plantas de buena calidad, preferiblemente en alveolos de 200–325 cm<sup>3</sup> y de una o dos savias. Se pueden reforzar las

plantaciones con siembras de ecotipos locales o adaptados al clima futuro, asegurando la procedencia genética adecuada según la regulación española y considerando las regiones de procedencia o de identificación para maximizar la supervivencia, el crecimiento y la resiliencia frente al cambio climático.

**Distribución espacial de las plantaciones:** Se pueden usar módulos predefinidos o distribuir las plantas *in situ* para lograr un patrón más heterogéneo que imite la naturaleza.

**Ejecución de las plantaciones:** La fecha de plantación debe evitar períodos secos, cálidos o de heladas, ajustándose a las condiciones locales y al cambio climático.

**Ajuste del diseño en el terreno:** El replanteo en campo permite adaptar el diseño a las condiciones del terreno, optimizando la distribución y el desarrollo de las plantas.

**Preparación del terreno:** Es necesario acondicionar el suelo y abrir hoyos de un volumen adecuado para favorecer el crecimiento radicular y el establecimiento de las plantas.

**Plantación:** Las plántulas deben colocarse verticalmente, cubriendo el cepellón y asegurando buena conexión con el suelo.

**Colocación de protectores:** Se recomienda usar tubos o mallas para proteger frente a herbívoros, ajustando el tipo y la duración de la protección según la especie y el riesgo.

**Mantenimiento de las plantaciones:** Durante los primeros 3-5 años se requiere un cuidado mínimo, pero fundamental para asegurar la supervivencia y el crecimiento. Sin embargo, esto no siempre es posible, pues consume importantes recursos económicos y humanos.

**Riegos:** El riego de establecimiento solo se considerará si el suelo está seco o no llueve después de la plantación, aportando 5-10 L por planta para activar las raíces. Puede realizarse un riego de auxilio durante el primer verano.

**Reposición de marras:** Se recomienda reponer marras solo una vez, tras el primer o segundo verano, si la supervivencia está por debajo del 70%.

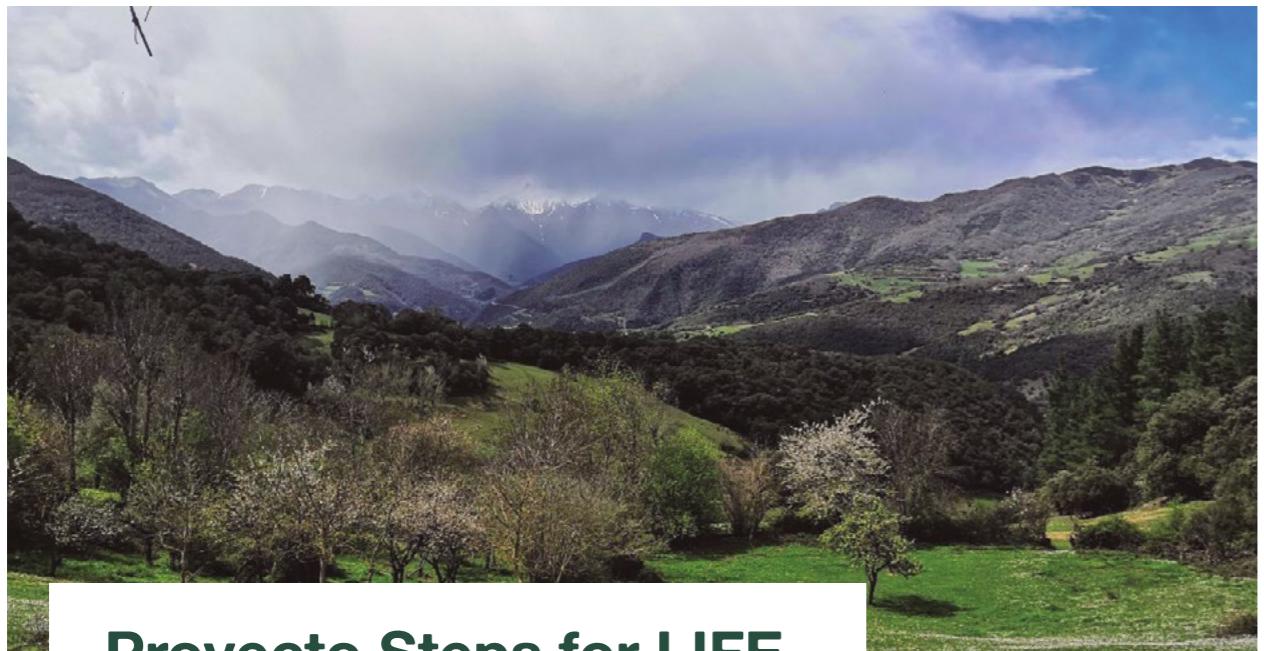
En el **Anexo II** se incluye información detallada sobre las directrices técnicas para la mejora de la IFV mediante plantaciones.



# 7

## Casos de éxito de infraestructura verde y conectividad ecológica

En este apartado se presentan tres casos de éxito de IFV y conectividad ecológica, que pueden servir de inspiración para su replicación en otros territorios, seleccionados entre los 37 proyectos identificados en una revisión *ad-hoc*. Aunque existen numerosos proyectos exitosos, se han seleccionado tres representativos de distintas regiones que abordan diferentes tipos de ecosistemas en regiones bioclimáticas distintas. Todos ellos incorporan además la perspectiva de género y/o edad.



### Proyecto Steps for LIFE

<https://stepsforlifeproject.org/>

#### ¿QUÉ ES?

Es un proyecto cofinanciado por el [Programa LIFE](#) de la Unión Europea, coordinado por la Fundación Camino Lebaniego con sede en Santander y cuyos socios son [SEO-Cantabria](#),

[AMICA](#), [AMPROS](#), [FIRE](#) y la [Cámara Municipal de Vilanova de Gaia](#).

Su objetivo es transformar los Caminos No Motorizados de Largo Recorrido (CNMLR) en infraestructura verde multifuncional, integrando biodiversidad, cultura y turismo sostenible.

#### ZONA DE ACTUACIÓN

Abarca los caminos lebaniegos hacia Santo Toribio de Liébana (Cantabria) —Camino Lebaniego, vertiente leonesa (San Glorio), camino castellano (Piedrasluengas)— y un tramo del Camino de Santiago en Vila Nova de Gaia (Portugal).

#### PERÍODO DE EJECUCIÓN

2021-2026.

#### OBJETIVOS PRINCIPALES

1. Mejorar la conectividad ecológica mediante *stepping stones* o microhábitats que faciliten el movimiento de especies.
2. Conservar y restaurar hábitats y especies prioritarias (14 especies objetivo).
3. Impulsar la educación ambiental y sensibilización del público.
4. Proporcionar herramientas técnicas para gestores de CNMLR europeos.
5. Integrar naturaleza, cultura, turismo y economía local, promoviendo beneficios sociales y ambientales.

#### ALGUNOS RESULTADOS / ACCIONES VISIBLES

- Creación y restauración de microhábitats como charcas, setos y refugios para la fauna, manejo de praderas y gestión de árboles viejos.
- Organización de actividades de sensibilización, interpretación del medio natural y educación.

#### ¿POR QUÉ ES UN BUEN CASO DE ÉXITO DE IFV Y CONECTIVIDAD ECOLÓGICA?

- Tiene un enfoque integral y multifuncional (ecología, cultura, turismo, salud y economía).
- Aprovecha infraestructura existente para mejorar la conectividad real entre ecosistemas.
- Es replicable y escalable a otros territorios europeos.
- Está alineado con estrategias nacionales y europeas como la Estrategia de Biodiversidad de la UE para el 2030.
- Propicia una fuerte participación local, lo que asegura su sostenibilidad y el retorno social.

#### IMPACTO SOBRE MUJERES Y JÓVENES

El proyecto tiene una acción específica dirigida a diseñar un programa de educación ambiental que prevé la participación de más de 2.500 escolares mediante distintas actividades como talleres, materiales didácticos y visitas al campo. Este trabajo refuerza el papel de la juventud como agentes de cambio en la conservación de la biodiversidad y el desarrollo sostenible del territorio.



## Proyecto Corredor Verde Tamaraceite–Ciudad Alta

<https://www.laspalmasgc.es/es/areas-tematicas/urbanismo-e-infraestructuras/desarrollo-y-renaturalizacion-urbana/corredor-tamaraceite-ciudad-alta/>

### ¿QUÉ ES?

Es un proyecto financiado por la convocatoria de ayudas para el impulso de la renaturalización de ciudades 2022 de la Fundación Biodiversidad y promovido por el Ayuntamiento de Las Palmas de Gran Canaria.

Su objetivo es fortalecer la infraestructura verde, mejorar las condiciones de biodiversidad en la ciudad de Las Palmas de Gran Canaria y mejorar su conexión con los espacios protegidos y el área rural del entorno.

### ZONA DE ACTUACIÓN

Municipio de Las Palmas de Gran Canaria (Islas Canarias).

### PERÍODO DE EJECUCIÓN

2023-2025.

### OBJETIVOS PRINCIPALES

1. Desarrollar una propuesta de renaturalización de alto impacto, favoreciendo la conectividad ecológica y la presencia de especies autóctonas.

2. Incentivar la regeneración natural del lagarto gigante de Gran Canaria (*Gallotia stehlini*) mediante soluciones piloto de referencia.
3. Recuperar bosques termófilos, palmerales y matorrales autóctonos en zonas urbanas y periurbanas.
4. Ampliar y mejorar la biodiversidad en el espacio urbano consolidado.
5. Impulsar la gobernanza, la participación ciudadana y la transferencia de conocimiento.

### ACCIONES Y RESULTADOS DESTACADOS

- Plan Director de la Biodiversidad y la infraestructura verde de Las Palmas de Gran Canaria.
- Acciones dirigidas a mejorar la conectividad ecológica y la biodiversidad de la urbe, con más de 400.000 m<sup>2</sup> de superficie urbana renaturalizada, más de 12.000 m lineales de corredores verdes establecidos y más de 10.300 individuos plantados.
- Programas de comunicación, educación ambiental y participación comunitaria.
- Integración del corredor en la planificación urbana y de movilidad.

### ¿POR QUÉ ES UN CASO DE ÉXITO EN INFRAESTRUCTURA VERDE Y CONECTIVIDAD ECOLÓGICA?

- Tiene un enfoque integral urbano que une biodiversidad, bienestar y resiliencia.

- Favorece la conectividad ecológica real entre zonas verdes urbanas.
- Promueve la participación comunitaria activa, clave para la sostenibilidad.
- Es un modelo replicable en otros barrios y ciudades.
- Está alineado con políticas de sostenibilidad urbana y adaptación climática.

### IMPACTO SOBRE MUJERES Y JÓVENES

El proyecto fomenta la implicación de mujeres y jóvenes en actividades de restauración, educación ambiental y participación ciudadana. Por ejemplo, promueve la participación igualitaria de hombres y mujeres en las actividades de formación y/o capacitación e integra la perspectiva de género en el plan de comunicación. Así mismo, promueve actividades de sensibilización a jóvenes mediante un programa de charlas y talleres sobre la renaturalización urbana en colaboración con la Universidad de las Palmas de Gran Canaria y otros centros educativos.



## Campo de Montiel más natural

<https://fundacionfire.org/lineas-proyectos/campo-de-montiel-natural/>

### ¿QUÉ ES?

Es una Iniciativa de la Fundación FIRE para aumentar la biodiversidad y sus servicios, la resiliencia climática y el bienestar humano en la región de Campo de Montiel (Ciudad Real y Albacete).

Su objetivo es impulsar la regeneración del territorio mediante una restauración holística del paisaje, integrando el capital natural, social y económico.

### ZONA DE ACTUACIÓN

Comarca del Campo de Montiel, unas 620.000 ha de mosaico agrícola y forestal mediterráneo continental.

### PERÍODO DE EJECUCIÓN

Iniciado en 2021.

### OBJETIVOS PRINCIPALES

- Promover la restauración agroecológica, forestal y urbana para mejorar la conectividad ecológica del paisaje y su resiliencia climática.
- Fomentar la biodiversidad nativa mediante acciones de conservación, restauración y creación de hábitats.
- Establecer un laboratorio vivo de demostración de prácticas sostenibles en agricultura y gestión

forestal compatibles con la producción.

- Co-diseñar un plan de paisaje a largo plazo que consolide Campo de Montiel como un territorio regenerativo promoviendo la participación de los distintos actores del territorio.
- Transferir, capacitar e inspirar a otros actores y entidades.

### ACCIONES Y RESULTADOS DESTACADOS

- Promoción de prácticas de agricultura regenerativa e introducción de elementos del paisaje ricos en especies como setos, charcas y refugios para la fauna.
- Gestión forestal sostenible de reforestaciones de la PAC y masas de monte mediterráneo degradadas.
- Establecimiento y gestión del Laboratorio vivo de restauración agroecológica y forestal *La Nava del Conejo*.
- Identificación de zonas prioritarias para el establecimiento de una red de setos e islotes forestales para conectar los principales hábitats forestales y agrícolas en la comarca.
- Organización de visitas, talleres y cursos para la transferencia del conocimiento dirigidos a distintos colectivos relevantes.
- Integración del proyecto en la *Red de Territorios Regenerativos* de la Península Ibérica y Baleares.

### ¿POR QUÉ ES UN CASO DE ÉXITO EN INFRAESTRUCTURA VERDE Y CONECTIVIDAD ECOLÓGICA?

- Integra la conservación, la agricultura sostenible, la restauración forestal y la renaturalización urbana.

- Actúa a escala de paisaje, con alto impacto en la biodiversidad y el clima.
- Diversifica las fuentes de financiación, asegurando su sostenibilidad financiera en el largo plazo.
- Constituye un modelo demostrativo y replicable, con fines educativos y de transferencia.
- Tiene arraigo local, que refuerza el impacto social, económico y ambiental.

### IMPACTO SOBRE MUJERES Y JÓVENES

El proyecto promueve activamente la participación de mujeres y jóvenes en investigación, restauración y educación ambiental a través de iniciativas como:

- [Campo de Montiel más Natural y Resiliente](#) (Fundación Biodiversidad), que promovió actividades formativas dirigidas a garantizar una participación equilibrada de mujeres y hombres.
- [Forests4Bats y Forrest](#) (Fundación Montemadrid y Caixabank), que impartieron talleres dirigidos a escolares de la región.
- [NavaLAB](#) (FECYT), que estableció una ruta auto-guiada para las visitas de estudiantes universitarios y de secundaria, entre otros colectivos, en el Laboratorio vivo de restauración agroecológica y forestal *La Nava del Conejo*.

Además, en el proyecto participan investigadoras, técnicas, agricultoras y ganaderas, promoviendo la igualdad en la restauración ecológica y la gestión del territorio y de la IFV.

# Conclusiones

Esta *Guía para la adaptación al cambio climático y resiliencia de la Infraestructura Verde en España*, elaborada en el marco del proyecto ForesteCCo, proporciona un marco integral para la planificación y gestión de la IFV en España peninsular e Islas Baleares. La guía se alinea con marcos normativos y estratégicos internacionales, europeos y nacionales, contribuyendo al cumplimiento de compromisos de conservación de la biodiversidad, restauración de ecosistemas y adaptación al cambio climático. Las principales conclusiones son:

- El **cambio climático** modifica la distribución de especies y la estructura y función de los ecosistemas. Anticipar estos cambios es clave para conservar la biodiversidad y garantizar la resiliencia de los ecosistemas.
- Mantener y potenciar la **diversidad genética** de las especies forestales aumenta su capacidad de adaptación y fortalece la resiliencia de los ecosistemas terrestres frente a amenazas bióticas y abióticas.
- La **identificación de áreas prioritarias** para la conservación de la IFV mediante el análisis de áreas relevantes de biodiversidad y de conectividad es clave para la planificación estratégica de la IFV en el futuro.
- Los análisis identificaron que las **zonas montañosas** de España e Islas Baleares serán los **principales refugios climáticos** en el futuro, por lo que deben ser objeto de conservación y restauración prioritarias, por ejemplo, mediante la ampliación de la red de Espacios Naturales Protegidos.
- Existen **diversos enfoques** para la conservación y mejora de la IFV. Se reconoce la complementariedad de la regeneración natural, la restauración forestal asistida y la restauración forestal reconstructiva, dependiendo del contexto y los recursos disponibles, priorizando soluciones basadas en la naturaleza y escalables desde el nivel local al nivel regional.
- El conocimiento y el seguimiento de **directrices técnicas** basadas en el mejor conocimiento científico disponible son fundamentales para una correcta restauración de la IFV. La guía ofrece recomendaciones sobre plantaciones forestales que pueden ser útiles para las administraciones públicas, empresas privadas y, en general, los gestores del territorio.
- Los **casos de éxito** analizados demuestran la existencia de iniciativas diversas que promueven la conectividad ecológica, la biodiversidad y la resiliencia climática, incorporando además la participación de mujeres y jóvenes, y constituyen modelos replicables en distintos contextos y escalas.

En síntesis, resaltamos que la **planificación y la gestión de la IFV en el contexto actual de cambio climático requiere un enfoque holístico** que combine ciencia, técnicas de restauración, gobernanza inclusiva y adaptación climática para garantizar ecosistemas más resilientes y sostenibles a largo plazo.

# Referencias

- Aparício, B. A., Santos, J. A., Freitas, T. R., Sá, A. C. L., Pereira, J. M. C., & Fernandes, P. M. 2022. Unravelling the effect of climate change on fire danger and fire behaviour in the Transboundary Biosphere Reserve of Meseta Ibérica (Portugal-Spain). *Climatic Change*, 173(1-2). <https://doi.org/10.1007/s10584-022-03399-8>
- Atkinson, J., & Bonser, S. P. 2020. “Active” and “passive” ecological restoration strategies in meta-analysis. *Restoration Ecology*, 28(5), 1032–1035. <https://doi.org/10.1111/rec.13229>
- Chazdon, R., & Brancalion, P. 2019. Restoring forests as a means to many ends. *Science*, 365(6448), 24-25. <https://doi.org/10.1126/science.aax9539>
- Chazdon, R., Lindenmayer, D., Crouzeilles, R., Rey Benayas, J. M., Chavero, E. L., & Guariguata, M. R. 2020. *La regeneración natural del bosque en tierras abandonadas como estrategia de restauración* (Vol. 286). CIFOR. <https://doi.org/10.17528/cifor/007621>
- Crouzeilles, R., Ferreira, M. S., Chazdon, R. L., Lindenmayer, D. B., Sansevero, J. B. B., Monteiro, L., Iribarrem, Á., Latawiec, A. E., & Strassburg, B. B. N. 2017. Ecological restoration success is higher for natural regeneration than for active restoration in tropical forests. *Science Advances*, 3(11), e1701345. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701345>
- Cuesta, B., Villar-Salvador, P., Puertolas, J., Rey Benayas, J. M., & Michalet, R. 2010. Facilitation of *Quercus ilex* in Mediterranean shrubland is explained by both direct and indirect interactions mediated by herbs. *Journal of Ecology*, 98(3), 687–696. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2010.01655.x>
- Edris, S., Gabourel-Landaverde, V. A., Schnabel, S., Rubio-Delgado, J., & Olave, R. 2025. Contribution of European Agroforestry Systems to Climate Change Mitigation: Current and Future Land Use Scenarios. *Land*, 14(11), 2162. <https://doi.org/10.3390/land14112162>
- FAO. 2025. *The status of Mediterranean forests 2025*. Rome.
- Felicísimo, Á. M., J. Muñoz, C. Villalba, and R. G. Mateo. 2011. *Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático de la biodiversidad española. 2. Flora y vegetación*. Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid.
- Gallardo, M., Fernández-Portela, J., Cocco, D., & Vilar, L. 2023. Land Use and Land Cover Changes in Depopulated Areas of Mediterranean Europe: A Case Study in Two Inland Provinces of Spain. *Land*, 12(11), 1967. <https://doi.org/10.3390/land12111967>
- García-Valdés, R., Zavala, M. A., Araújo, M. B., & Purves, D. W. 2013. Chasing a moving target: projecting climate change-induced shifts in non-equilibrium tree species distributions. *Journal Of Ecology*, 101(2), 441-453. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12049>
- Garrote, P. J., Bugalho, M. N., & Fedriani, J. M. 2023. Seedling responses to moderate and severe herbivory: A field-clipping experiment with a keystone Mediterranean palm. *Plant Biology*, 25(7), 1058–1070. <https://doi.org/10.1111/plb.13584>
- Goicoealde, T., Morales-Barbero, J., García-Viñas, J. I., Gastón, A., Aroca-Fernández, M. J., Calleja, J. A., Moreno, J. C., Ramos-Gutiérrez, I., Rodríguez, M. Á., Lima, H., Broennimann, O., Guisan, A., Adde, A., Pérez-Latorre, A. V., & Mateo, R. G. 2025. geoSABINA: a unified plant ecology database for Spain. *Research Square (Research Square)*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5928444/v1>
- Hampe, A., & Petit, R. J. 2005. Conserving biodiversity under climate change: the rear edge matters. *Ecology Letters*, 8(5), 461-467. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00739.x>
- Hlásny, T., Mokroš, M., Dobor, L., Mergani-ová, K., & Lukac, M. 2021. Fine-scale variation in projected climate change presents opportunities for biodiversity conservation in Europe. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96717-6>
- Hua, F., Bruijnzeel, L. A., Meli, P., Martin, P. A., Zhang, J., Nakagawa, S., Miao, X., Wang, W., McEvoy, C., Peña-Arancibia, J. L., Brancalion, P. H. S., Smith, P., Edwards, D. P., & Balmford, A. 2022. The biodiversity and ecosystem service contributions and trade-offs of forest restoration approaches. *Science*, 376(6595), 839-844. <https://doi.org/10.1126/science.abl4649>
- IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844
- Leites, L., & Garzón, M. B. 2023. Forest tree species adaptation to climate across biomes: Building on the legacy of ecological genetics to anticipate responses to climate change. *Global Change Biology*, 29(17), 4711-4730. <https://doi.org/10.1111/gcb.16711>
- Leiva, M. J., & Fernández-Alés, R. 2005. Holm-oak (*Quercus ilex* subsp. *ballota*) acorns infestation by insects in Mediterranean dehesas and shrublands: Its effect on acorn germination and seedling emergence. *Forest Ecology and Management*, 212(1-3), 221–229. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.03.027>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. 2021. *Estrategia nacional de infraestructura verde y de la conectividad y restauración ecológicas: Orden*

PCM/735/2021, de 9 de julio (BOE núm. 166, de 13 de julio de 2021). BOE.

- Mola, I.; Sopeña, A.; y De Torre, R. (2018). *Guía Práctica de Restauración Ecológica*. Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica. Madrid.
- Muluneh, M. G. 2021. Impact of climate change on biodiversity and food security: a global perspective—a review article. *Agriculture & Food Security*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40066-021-00318-5>
- Ogaya, R., & Peñuelas, J. 2021. Climate Change Effects in a Mediterranean Forest Following 21 Consecutive Years of Experimental Drought. *Forests*, 12(3), 306. <https://doi.org/10.3390/f12030306>
- Passos, I., Figueiredo, A., Almeida, A. M., & Ribeiro, M. M. 2024. Uncertainties in Plant Species Niche Modeling under Climate Change Scenarios. *Ecologies*, 5(3), 402-419. <https://doi.org/10.3390/ecologies5030025>
- Peláez, M., Rey-Benayas, J. M., Andivia, E., Navarro, T., & Zavala, M. A. 2024. Acorn removal and seedling age determine oak (*Quercus ilex* L. and *Q. suber* L.) restoration outcome in ungulate-dominated Mediterranean environments. *Annals of Forest Science*, 81, Article 38. <https://doi.org/10.1007/s13595-024-01147-9>
- Pons, J., & Pausas, J. G. 2007a. Acorn dispersal estimated by radio-tracking. *Oecologia*, 153(4), 903–911. <https://doi.org/10.1007/s00442-007-0788-x>
- Ramyar, R., Ackerman, A., & Johnston, D. M. 2021. Adapting cities for climate change through urban green infrastructure planning. *Cities*, 117, 103316. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2021.103316>
- Rebollo, P., Moreno-Fernández, D., Cruz-Alonso, V., Gazol, A., Rodríguez-Rey, M., Astigarraga, J., Zavala, M. A., Gómez-Aparicio, L., Andivia, E., Miguel-Romero, S., & Ruiz-Benito, P. 2024. Recent increase in tree damage and mortality and their spatial dependence on drought intensity in Mediterranean forests. *Landscape Ecology*, 39(3). <https://doi.org/10.1007/s10980-024-01837-9>
- Rey Benayas, J. M., & De la Montaña, E. 2003. Identifying areas of high-value vertebrate diversity for strengthening conservation. *Biological Conservation*, 114(3), 357-370. [https://doi.org/10.1016/s0006-3207\(03\)00064-8](https://doi.org/10.1016/s0006-3207(03)00064-8)
- Rey Benayas, J. M., Bullock, J. M., & Newton, A. C. 2008. Creating woodland islets to reconcile ecological restoration, conservation and agricultural land use. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6(6), 329–336. <https://doi.org/10.1890/070057>
- Rey Benayas, J. M., & Bullock, J. M. 2015. Vegetation Restoration and Other Actions to Enhance Wildlife in European Agricultural Landscapes. En H. Pereira & L. Navarro (Eds.), *Rewilding European Landscapes* (pp. 127–142). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-12039-3\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-12039-3_7)

- Rey Benayas, J.M. y de Torre Cejas, R. 2017. Medidas para fomentar la conectividad entre Espacios Naturales protegidos y otros Espacios de Alto Valor Natural en España. FIRE, MNCN-CSIC y MAPAMA. Madrid.
- Rey-Benayas, J. M., Valencia, A., Díez-de la Macorra, L., Crespo-Cepas, G. & García-Pose, A. 2025a. Planted hedgerows and fenced perches speed up the slow woodland recovery in continental Mediterranean farmland. *European Journal of Forest Research*. <https://doi.org/10.1007/s10342-025-01816-y>
- Rey Benayas, J. M., Bullock, J. M., & Pereira, H. M. 2025b. A multi-scale approach to integrating rewilding into agricultural landscapes. *Frontiers In Ecology And The Environment*. <https://doi.org/10.1002/fee.2860>
- Ribalaygua, J., Torres, L., Pórtoles, J., Monjo, R., Gaitán, E., & Pino, M. R. 2013. Description and validation of a two-step analogue/regression downscaling method. *Theoretical And Applied Climatology*, 114(1-2), 253-269. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0836-x>
- Rubenstein, M. A., Weiskopf, S. R., Bertrand, R., Carter, S. L., Comte, L., Eaton, M. J., Johnson, C. G., Lenoir, J., Lynch, A. J., Miller, B. W., Morelli, T. L., Rodriguez, M. A., Terando, A., & Thompson, L. M. 2023. Climate change and the global redistribution of biodiversity: substantial variation in empirical support for expected range shifts. *Environmental Evidence*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s13750-023-00296-0>
- Simonson, W. D., Miller, E., Jones, A., García-Rangel, S., Thornton, H., & McOwen, C. 2021. Enhancing climate change resilience of ecological restoration — A framework for action. *Perspectives In Ecology And Conservation*, 19(3), 300-310. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2021.05.002>
- IUCN, 2020. *Global Standard for Nature-based Solutions. A user-friendly framework for the verification, design and scaling up of NbS*. First edition. Gland, Switzerland: IUCN.
- Vieco-Martínez, A., Rey-Benayas, J. M., Oliet, J. A., Villar-Salvador, P., & Martínez-Baroja, L. 2023. Efectos de la forestación de tierras agrícolas mediterráneas y de su manejo en el establecimiento de árboles y arbustos. *Ecosistemas*, 32(especial), Artículo 2460. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2460>
- Voltas, J. 2023. Tres siglos de Genética Forestal: situación actual, retos e incertidumbres. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 49(2): 101-116. <https://doi.org/10.31167/csef.v0i49.19939>
- Zamora, R., Hódar, J. A., Matías, L., & Mendoza, I. 2010. Positive adjacency effects mediated by seed disperser birds in pine plantations. *Ecological Applications*, 20(4), 1053–1060. <https://doi.org/10.1890/09-0055.1>

# Anexos

## Anexo I. Metodología OE1.

En este Anexo se presentan los detalles metodológicos del **OE1. Identificar las áreas clave de alto valor ecológico prioritarias para la conservación de la biodiversidad basándose en resultados del análisis de fragmentación.**

### 1. Recopilar y generar escenarios locales de clima futuro para el territorio español peninsular e Islas Baleares.

Se recopilaron series temporales climáticas de datos observados ([Aemet](#)) así como de los escenarios climáticos oficiales disponibles para todo el territorio de la España peninsular y Baleares ([AdapteCCa](#), [Euro-Cordex](#), entre otros) y se generó una base de datos para almacenar la información de manera sistemática. Se realizó un análisis para identificar los errores y la ausencia de datos y un control de calidad para poder realizar las correcciones necesarias.

Posteriormente, se generaron escenarios complementarios de alta resolución para cubrir las necesidades del proyecto cumpliendo los requerimientos científico-técnicos necesarios conforme al estado del arte en la materia. Para ello, se generaron escenarios climáticos futuros a partir de observaciones diarias de precipitación acumulada (5.577 observatorios) y de las temperaturas mínimas y máximas (2.515 observatorios) para el periodo de referencia climático (1985-2014) y para tres escenarios de clima futuro (2021-2050, 2041-2070 y 2071-2100). Para las simulaciones climáticas futuras se utilizaron un conjunto de modelos climáticos (en concreto 10) pertenecientes a la sexta fase del programa Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6) desarrollados en el marco del [6º Informe del IPCC](#), y cuatro trayectorias socioeconómicas compartidas (SSPs por sus siglas en inglés de *Shared Socioeconomic Pathways*). El uso de los modelos climáticos CMIP6, así como de los SSPs garantiza que la información climática empleada es la más actual posible, empleando los modelos climáticos más potentes, en concreto los Earth System Models (ESMs) y el concepto más actual de evolución futura. Para la generación de las proyecciones climáticas se ha aplicado una metodología de *downscaling* estadístico denominada FICLIMA (Ribalaygua *et al.*, 2013) que trabaja en dos pasos: primero selecciona, a partir de campos sinópticos de gran escala, los días análogos más parecidos al estado objetivo y, después, estima la señal local mediante modelos calibrados por estación (regresión para temperatura y esquema probabilístico para precipitación), generando series diarias de precipitación y de temperaturas máxima y mínima. El método empleado garantiza la rigurosidad de la información climática ya que cumple con los criterios mencionados en la introducción: trabaja

a escala diaria y local, se fundamenta en la modelización climática más actual y se aplican estrictos controles de verificación (evaluación del comportamiento de la metodología) y validación (comportamiento de los modelos climáticos simulando el clima actual). Este enfoque conserva coherencia con la circulación atmosférica, reproduce bien distribuciones y extremos, es eficiente en datos y cómputo y se escala con facilidad a múltiples GCM y escenarios. Por ello resulta idóneo para justificar estudios de impacto y la evaluación de medidas de adaptación a escala local. La información futura generada es diaria, pero, debido a los requerimientos del proyecto, tanto las series diarias observadas como pasadas se promediaron anualmente para cada periodo climático (30 años).

Tomando como base las fuentes disponibles en AdapteCCa (en el momento del estudio basadas en CMIP5) y a Euro-CORDEX (igualmente CMIP5), entre otros, usar una metodología de downscaling estadístico en dos pasos con forzamiento CMIP6 aporta ventajas claras: incorpora escenarios SSP y mejoras de los modelos climáticos en aspectos de modelización física, forzamientos y tamaño del conjunto; permite construir un multimodelo actualizado y homogéneo; genera series diarias locales de precipitación y de temperatura máxima y mínima calibradas con observaciones, preservando distribuciones y extremos relevantes para evaluación de impactos; reduce sesgos de malla y dependencias específicas de los emparejamientos entre modelos globales y regionales típicos de productos en rejilla; asegura coherencia intervariable y reproducibilidad; y facilita actualizaciones y comparabilidad entre escenarios frente a indicadores agregados o rejillas regionales sin corrección y validación local específicas.

A partir de estos conjuntos climáticos mensuales, se derivaron 25 variables bioclimáticas. Estas variables abarcaron métricas estacionales y anuales de temperatura y precipitación, así como la evapotranspiración de referencia (ET0). Diecinueve de estas variables corresponden a las utilizadas por WorldClim (Fick & Hijmans, 2017), aunque algunas de ellas se han adaptado para evitar problemas significativos, en particular aquellas que hacen referencia al trimestre más seco, húmedo, frío o cálido. El uso de las variables originales de WorldClim dio lugar a la aparición de discontinuidades abruptas. Por ejemplo, en la variable “temperatura del trimestre más húmedo” el periodo de cálculo se define con base en la precipitación, no en la propia temperatura. Así, a un lado de cierta frontera el trimestre más lluvioso es octubre-noviembre-diciembre, mientras que al otro es marzo-abril-mayo. Como las temperaturas medias de estos conjuntos de meses difieren notablemente, la métrica de temperatura cambia de forma abrupta al cruzar la frontera, generando discontinuidades artificiales. Estas no reflejan gradientes ecológicos reales, sino un artefacto derivado de acoplar la temperatura a un periodo seleccionado por otra variable.

Además de estas discontinuidades espaciales producidas por la definición de la variable, el problema se vuelve aún más complejo al trabajar con diferentes períodos temporales, ya que estas discontinuidades pueden aparecer también a lo largo del tiempo. Por ejemplo, si el cambio climático entre un período y otro provoca ligeras variaciones que implican un cambio en los meses que constituyen el trimestre más húmedo. De acuerdo con el ejemplo anterior, estas variaciones podrían producir diferencias de varios grados en la temperatura de dicho trimestre, lo que podría llevar al modelo de distribución de especies (SDM) a proyectar valores de idoneidad poco realistas para determinadas especies.

Para resolver este problema, el trimestre más seco, húmedo, frío y cálido se identificó en función del promedio del conjunto de la España peninsular y las Islas Baleares. Los meses correspondientes se utilizaron para todos los puntos de la cuadrícula y para todos los períodos temporales, eliminando así las discontinuidades espaciales y temporales y permitiendo utilizar las 19 variables sin descartar ninguna.

Se desarrolló una variable personalizada de  $ET_0$  con el fin de tener en cuenta las reducciones en la exposición a la radiación solar causadas por el sombreado topográfico, mejorando así la precisión microclimática en paisajes complejos. De acuerdo con el esquema de biovariables de WorldClim, se calcularon los valores de  $ET_0$  para el mes más seco, húmedo, frío y cálido, así como la estacionalidad. Estas variables de  $ET_0$  se calcularon según la fórmula de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998), pero con la radiación solar modificada por un factor basado en el ángulo de incidencia solar sobre el terreno para cada día del año (Figura 1A). Estas variables permiten captar el efecto de exposición o sombreado, que ejerce una influencia decisiva sobre la vegetación.

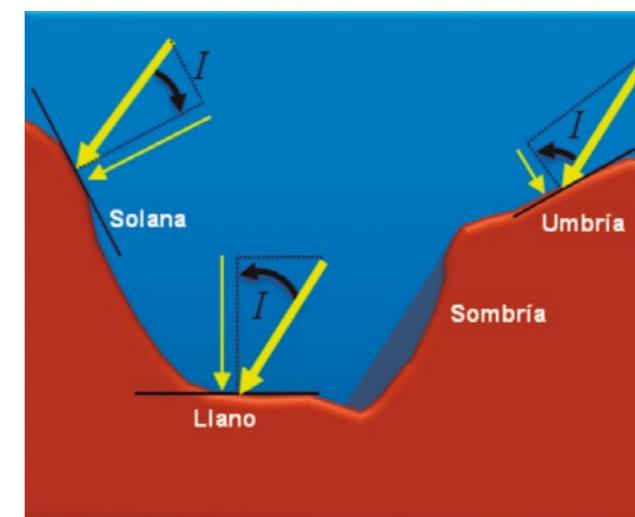


Figura 1A. Efecto del sombreado en base al ángulo de incidencia solar.

Con el fin de mejorar el realismo ecológico y el rendimiento del modelo, se incluyeron cuatro variables edáficas: contenido de arena (g/kg), nitrógeno (cg/kg), pH ( $\times 10$ ) y carbono orgánico del suelo (dg/kg). Todas ellas se obtuvieron de la base de datos SoilGrids ([www.soilgrids.org](http://www.soilgrids.org)) y se referencian a la capa superficial del suelo (0–5 cm).

## 2. Desarrollar Modelos de Distribución de Especies diferenciando grupos genéticos con diferentes respuestas adaptativas frente al cambio climático.

En primer lugar, se recopiló y analizó la información disponible para formar los grupos genéticos de las especies de estudio. Se diferenciaron los grupos genéticos de las 12 especies seleccionadas en el proyecto mediante el análisis de la información genotípica y fenotípica disponible en la base de datos del [INIA-CSIC](#). De esta manera, se obtuvo información de diferentes grupos genéticos con diferentes capacidades adaptativas frente a las condiciones ambientales. Esta información fue usada para la clasificación de los registros de presencia.

En segundo lugar, se calibraron, evaluaron y proyectaron los Modelos de Distribución de Especies (MDE) de las especies seleccionadas en los distintos escenarios de cambio climático. En total, se desarrollaron MDE de cada una de las 44 especies consideradas. Además, se modelizó cada uno de los grupos genéticos de 12 de ellas.

Los Modelos de Distribución de Especies se desarrollaron en el marco de un enfoque de pronóstico por consenso, con el fin de combinar las capacidades predictivas de múltiples algoritmos y reducir la incertidumbre inherente a los modelos individuales (Araújo & New, 2007; Marmion *et al.*, 2009; Mateo *et al.*, 2019; Mateo *et al.*, 2024). Esta modelización se realizó conjuntamente entre la Universidad Autónoma de Madrid (UAM) y la Fundación para la Investigación del Clima (FIC).

Todos los análisis se realizaron en R (R Core Team, 2025) utilizando el paquete *covsel* (Adde *et al.*, 2023) para la selección de variables y el paquete *biomod2* (Thuiller *et al.*, 2023; Mateo *et al.*, 2024) para el MDE.

Para cada especie y grupo genético, los modelos se calibraron empleando tres algoritmos con fortalezas complementarias en modelización ecológica: Modelos Lineales Generalizados (*Generalized Linear Models*, GLM), Bosques Aleatorios (*Random Forests*, RF) y Árboles de Regresión Aumentados (*Boosted Regression Trees*, BRT) (Mateo *et al.*, 2024). Estos métodos son ampliamente reconocidos por su capacidad de captar un rango de respuestas ecológicas, desde

tendencias lineales simples hasta interacciones no lineales complejas entre clima, suelo y distribución de especies (Elith & Leathwick, 2009; Guisan *et al.*, 2017).

El conjunto de datos de ocurrencia de cada taxón se dividió aleatoriamente en un 80% para la calibración del modelo y un 20% para su evaluación. Para representar las condiciones ambientales de fondo, se generaron 10,000 puntos de pseudoausencia de forma aleatoria en toda la región de estudio (excepto en las celdas de presencia conocidas). Durante la calibración de los modelos estos puntos se ponderaron con una prevalencia de 0,5, de modo que ocurrencias y pseudoausencias equilibran su influencia en el ajuste independientemente de su número absoluto (Barbet-Massin *et al.*, 2012). Antes del ajuste de los modelos, las variables fueron evaluadas para detectar colinealidad mediante correlaciones de Pearson por pares ( $|r| > 0,7$ ), reteniendo la covariable más informativa en cada caso. Posteriormente, se aplicaron técnicas de regularización (GLM con elastic-net, GAM con penalización null-space y guided regularized Random Forest), a partir de los cuales las covariables se ordenan por su importancia y se seleccionaron las más relevantes para la calibración final, con el fin de mejorar la interpretabilidad y evitar redundancias y sobreajuste (Dormann *et al.*, 2013; Adde *et al.*, 2023).

Cada algoritmo (GLM, RF y BRT) se ejecutó con diez réplicas de validación cruzada, resultando en 30 ejecuciones de MDE por especie o grupo genético. El desempeño de los modelos se evaluó mediante el Área Bajo la Curva ROC (AUC; Hanley & McNeil, 1982), el *True Skill Statistic* (TSS; Allouche *et al.*, 2006), métricas que en conjunto describen el poder discriminatorio, la exactitud de clasificación y la fiabilidad en la jerarquización de idoneidad. En línea con el marco de pronóstico por consenso descrito por Araújo & New (2007), sólo se retuvieron los modelos con  $AUC \geq 0,8$ , y a partir de ellos se construyó un modelo consenso para cada taxón, promediando las predicciones de las réplicas retenidas, ponderadas según su valor de AUC, favoreciendo así las réplicas más precisas y reduciendo la influencia de aquellas con menor rendimiento (Marmion *et al.*, 2009).

Este procedimiento generó un mapa de idoneidad de consenso para el periodo climático de referencia. Como resultado de este proceso, se obtuvieron tres tipos de resultados: 1) compendio de datos y resultados estadísticos que sintetizan la validez de los modelos, 2) mapas (geotif) de distribución de la idoneidad de cada taxón y 3) mapas (geotif) de presencia / ausencia de cada taxón usando el punto de corte derivado del análisis estadístico.

Los modelos por consenso se proyectaron posteriormente sobre el conjunto completo de 120 escenarios climáticos regionalizados (diez modelos climáticos  $\times$  cuatro SSP  $\times$  tres horizontes temporales). Como resultado se obtienen 120 mapas de idoneidad y 120 mapas de presencia / ausencia por cada taxón.

### 3. Evaluar el impacto del cambio climático sobre los hábitats y generar indicadores de fragmentación basándose en los mapas de los MDE generados previamente.

El análisis de fragmentación del hábitat tuvo cuatro fases principales: selección de escenarios climáticos y ejes de cambio, preparación de datos, cálculo de métricas espaciales y evaluación de resultados.

**a) Escenarios climáticos y ejes de cambio (EC).** Se consideraron tres trayectorias socioeconómicas (SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5), descartando SSP1-2.6 por su baja probabilidad de ocurrencia, inferior al 4% respecto al convenio de París (Bevacqua *et al.*, 2025). Cada escenario se analizó en tres períodos futuros (2021-2050, 2041-2070 y 2071-2100), además del presente, conformando cuatro momentos comparables (**Tabla 1A**).

**Tabla 1A.** Ejes de cambio estudiados (trayectorias socioeconómicas y períodos temporales) en el marco del proyecto.

Eje de cambio (EC)	Actual	2021-2050 (2035)	2041-2070 (2055)	2071-2100 (2085)
SSP245			(EC1)	
SSP370			(EC2)	
SSP585			(EC3)	

**b) Preparación de los datos.** Se emplearon MDEs generados a partir de diez modelos climáticos, seleccionando la mediana de probabilidad de presencia para cada celda. Los mapas de idoneidad fueron proyectados a un sistema métrico y reclasificados en mapas de presencia/ausencia mediante el estadístico ROC en R. Finalmente, se elaboraron mapas combinados que integran los cuatro períodos de cada eje de cambio mediante el paquete *landscapemetrics* en R, asignando valores diferenciados a cada horizonte temporal para identificar áreas estables, de pérdida o de colonización potencial.

**c) Cálculo de métricas de fragmentación.** El análisis se realizó a nivel de clase de cobertura, constituyendo cada especie o grupo genético una de estas clases. Empleando el paquete *landscapemetrics* (v 1.5.7) (Hesselbarth *et al.* 2019) se calcularon 7 métricas a nivel de clase que proporcionan una base robusta para interpretar la dinámica espacial de la idoneidad climática futura bajo diferentes escenarios de cambio climático, y permiten orientar estrategias de conservación y manejo basadas en criterios ecológicos sólidos.

- **Área total de clase (Total class area):** suma el área (ha) de todos los parches que pertenecen a la clase i (ej. especie en periodo 2041-2070 y SSP3-7.0)
- **Coeficiente de variación del índice de contigüidad de parche (Coefficient of variation of Contiguity index):** Calcula, para cada clase, el valor promedio de la conectividad interna de sus parches, es decir, cómo de contiguas están las celdas dentro de cada parche. Para ello, se asigna el valor 1 a todas las celdas del parche y se excluyen las demás (NA). Luego se aplica una matriz focal de 3x3 celdas (nueve celdas) que evalúa cuántas celdas vecinas también pertenecen al mismo parche, lo que permite estimar su cohesión interna.
- **Índice de agregación (Clumpiness index):** Es una medida que indica qué tanto las áreas de una misma clase (por ejemplo, un tipo de hábitat) tienden a agruparse o estar juntas en el paisaje, en comparación con lo que se esperaría si estuvieran distribuidas al azar. Cuanto más alto es el índice, más agrupados están los parches de esa clase mientras que cuanto más bajo es su valor, están más dispersos.
- **Borde total (Total Edge):** Es la suma de todos los bordes que una clase (por ejemplo, un tipo de cobertura del suelo) comparte con otras clases. Cuanto más fragmentado esté el paisaje, más bordes habrá. Por eso, un valor alto indica mayor fragmentación.
- **Densidad de parches (Patch density):** Indica cuántos parches hay de una clase por unidad de área. Se usa para medir la fragmentación: más parches significa mayor fragmentación. No dice cómo están distribuidos esos parches, pero al estar estandarizada por área, permite comparar paisajes de distinto tamaño.
- **Número de parches (Number of Patches):** Describe cómo de fragmentada está una clase (por ejemplo, un tipo de hábitat), pero no da detalles sobre cómo están distribuidos los parches ni sobre su tamaño o forma. El valor es 1 si solo hay un parche, y aumenta a medida que hay más parches, sin límite.
- **Índice de cohesión del parche (Patch Cohesion Index):** evalúa la relación entre el perímetro y el área de los parches, escalada a la extensión total del mapa, proporcionando información sobre la conectividad física de una clase de cobertura, así como su grado de agrupamiento espacial.

Todas las métricas se calcularon para el período de referencia (1985–2014; año central  $\approx$  2000) y para tres horizontes futuros: 2021–2050 (centrado en 2035), 2041–2070 (centrado en 2055) y 2071–2100 (centrado en 2085) en los cuatro escenarios climáticos SSP1-2.6 (muy optimista), SSP2-4.6 (optimista), SSP3-7.0 (pesimista) y SSP5-8.5 (muy pesimista). No obstante, se ha limitado la síntesis a los resultados obtenidos de acuerdo con el escenario SSP3-7.0, que representa una trayectoria de forzamiento intermedia-alta y ofrece una base coherente para la comparación entre especies.

**d) Evaluación espacial y de factibilidad.** Los mapas de idoneidad climática se contrastaron con la cobertura del suelo ([Corine Land Cover 2018](#)) y con las áreas protegidas (Parques Nacionales, Red Natura 2000, etc.) para identificar conflictos y oportunidades de conservación. Se calculó la riqueza de idoneidad del hábitat fitoclimático (RIHF) como la suma de las presencias de todas las especies y grupos genéticos (SpGg) normalizada por el total de especies analizadas, proporcionando un indicador de biodiversidad potencial.

#### 4. Identificación de las áreas clave de alto valor ecológico prioritarias para la conservación de la biodiversidad

Este paso incluyó la (a) identificación de las áreas relevantes de diversidad y (b) un análisis de la priorización de esfuerzos de gestión de la conectividad y la infraestructura verde.

**a) Áreas relevantes de biodiversidad.** Se realizó un análisis de las áreas relevantes de biodiversidad (ARBs) mediante el uso de los MDEs de todas las especies y grupos genéticos y una metodología adaptada de [Rey Benayas & De la Montaña \(2003\)](#) para el cálculo de un índice combinado de biodiversidad. Las ARBs se obtuvieron para el escenario actual y para el escenario climático y temporal intermedio (SSP3.70 2041–2070) con el objetivo de facilitar la operatividad de los resultados. Los pasos fueron:

- **Cálculo del índice de riqueza,  $S_r$** , donde  $S$  es el número de especies y grupos genéticos en la celda  $r$ . Este índice se obtuvo mediante el uso de la calculadora ráster del software QGis.
- **Cálculo del índice de rareza**, basado en la extensión del área de distribución geográfica, medido como el inverso del número de celdas donde la especie o grupo genético  $i$  está presente ( $\frac{1}{n_i}$ ). Para una celda  $r$ , el índice de rareza se calculó como:

$$\sum_{i=1}^S \frac{\left(\frac{1}{n_{ri}}\right)}{S_r}$$

donde  $S_r$  es el número total de especies y grupos genéticos en la celda. Este índice se calculó utilizando el paquete terra del software R en el entorno RStudio.

- **Cálculo del índice combinado de biodiversidad (ICB)**, que integra los dos índices anteriores según la fórmula:

$$\sum_{i=1}^S \frac{(1)}{n_{ri}}$$

donde la riqueza de especies está implícita en el sumatorio. Las zonas con mayor valor de ICB son las áreas más relevantes para la biodiversidad.

**b) Priorización de esfuerzos de gestión de la conectividad y la infraestructura verde.** Para la priorización de las áreas relevantes de biodiversidad identificadas para la adaptación al cambio climático y mejora de la infraestructura verde se establecieron una serie de criterios basados en el estudio de fragmentación. El punto de partida fueron los mapas (archivos .tif) de cambio en la idoneidad para cada especie o grupo genético en el eje de cambio 2041-2070 SSP 3-7.0. Estos mapas presentan cuatro categorías según el comportamiento de las especies en dicho escenario: hábitat inexistente (0), desaparición (1), expansión (2) y persistencia (3) en una determinada celda del territorio. Los pasos fueron los siguientes:

- **Cálculo de la persistencia/expansión/desaparición del conjunto de las especies y grupos genéticos.** Para simplificar la priorización, se unificaron los mapas de todas las especies y grupos genéticos en uno solo mediante el cálculo del valor modal (valor más frecuente) de entre las cuatro categorías de comportamiento para cada píxel. Para ello, se utilizó la biblioteca terra de R (referencia). Algunas consideraciones relevantes fueron:
  - » **Reemplazamiento del valor 0 por NA.** Para evitar que el valor 0 (“hábitat inexistente”) influyera en el cálculo de la tendencia, se realizó un reemplazamiento de estos valores por NA en cada uno de los ráster. Posteriormente, se reconstruyó un apilamiento (stack) de rásters sin

ceros, asegurando que todas las capas tuvieran un formato homogéneo para el análisis posterior. Así, el cálculo de la moda desestimó los valores NA.

- » **Detección de valores iguales en la moda.** En esta metodología, en el caso de igualdad o “empate” entre valores (dos o más valores con la misma frecuencia máxima), se elige automáticamente el primer valor, lo que podría generar un sesgo hacia la categoría 1 (desaparición). Para evitar este sesgo, se definió una función personalizada que evalúa, celda por celda, si hay empate en la moda (más de un valor con la frecuencia máxima). La función devuelve *TRUE* si existe un empate, *FALSE* si hay una moda única y *NA* si la celda no contiene datos. Esto permitió comprobar la ausencia de empates en el valor modal.
- » **Verificación de la representación de todas las especies en las categorías prioritarias.** Para comprobar que todas las especies estaban representadas en las categorías de expansión y persistencia (zonas prioritarias), se definió una función para verificar que cada especie tenía al menos una celda con valor 2 (expansión) o 3 (persistencia). Con esta comprobación se garantiza que todas las especies estén representadas a la hora de priorizar esfuerzos. Esto evita que las especies más raras o con nichos ecológicos más estrechos queden fuera de las zonas prioritarias de conservación/restauración.

Esta metodología permitió sintetizar la información de múltiples modelos de distribución de especies en el escenario futuro de estudio en un único mapa de tendencias, facilitando la identificación de áreas con riesgo de desaparición o con potencial de expansión y persistencia.

- **Zonas prioritarias para conservar o restaurar la conectividad.** Según las tres categorías del análisis de fragmentación, se establecieron dos criterios para la priorización de esfuerzos de conservación:
  - » **Zonas de “Expansión” y “Persistencia”.** Son zonas prioritarias para la conservación por su potencial para convertirse en refugios climáticos y de biodiversidad en el futuro.
  - » **Zonas de “Desaparición”.** Son zonas no prioritarias, donde se producirá el reemplazo de unas especies por otras. En estas zonas puede ser interesante implementar estrategias de gestión adaptativa.

- **Solapamiento con los Espacios Naturales Protegidos.** Finalmente, se evaluó el solapamiento o congruencia espacial de las zonas prioritarias con los Espacios Naturales Protegidos (ENPs), identificando vacíos de protección y posibles áreas para la ampliación de estos espacios. Se vectorizaron las capas del ICB y zonas prioritarias para calcular el porcentaje de solapamiento. En el caso del ICB, el solapamiento se analizó únicamente con las áreas relevantes de biodiversidad (ARBs) consideradas como el cuartil superior del índice (percentil 75).
- **Contraste del método:** comparación espacial con otros estudios. Finalmente, se compararon espacialmente los resultados del proyecto ForesteCCo con las zonas prioritarias para la conectividad en las categorías de bosques denso y claro del [Informe de Autopistas Salvajes de WWF](#) (2018).



## Referencias

- Adde, A., Rey, S. J., Brun, F., & Guisan, A. 2023. N-SDM: A high-performance computing pipeline for Nested Species Distribution Modelling. *Ecography*, 46(6), 1–13. <https://doi.org/10.1111/ecog.06540>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Allouche, O., Tsoar, A., & Kadmon, R. 2006. Assessing the accuracy of species distribution models: Prevalence, Kappa and the True Skill Statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology*, 43(6), 1223–1232. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2006.01214.x>
- Araújo, M. B., & New, M. 2007. Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in Ecology & Evolution*, 22(1), 42–47. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2006.09.010>
- Barbet-Massin, M., Jiguet, F., Albert, C. H., & Thuiller, W. 2012. Selecting pseudo-absences for species distribution models: How, where and how many?. *Methods in Ecology and Evolution*, 3(2), 327–338. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2011.00172.x>
- Bevacqua, E., Schleussner, C.F. & Zscheischler, J. A year above 1.5°C signals that Earth is most probably within the 20-year period that will reach the Paris Agreement limit. *Nat. Clim. Chang.* 15, 262–265 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41558-025-02246-9>
- Dormann, C. F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., ... & Lautenbach, S. 2013. Collinearity: A review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 36(1), 27–46. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x>
- Elith, J., & Leathwick, J. R. 2009. Species distribution models: Ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 40, 677–697. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159>
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. 2017. WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Guisan, A., Edwards, T. C., & Hastie, T. 2017. Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: Setting the scene. *Ecological Modelling*, 157(2–3), 89–100. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00204-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00204-1)
- Hanley, J. A., & McNeil, B. J. 1982. The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve. *Radiology*, 143(1), 29–36. <https://doi.org/10.1148/radiology.143.1.7063747>
- Marmion, M., Parviainen, M., Luoto, M., Heikkinen, R. K., & Thuiller, W. 2009. Evaluation of consensus methods in predictive species distribution modelling. *Diversity and Distributions*, 15(1), 59–69. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2008.00491.x>
- Mateo, R. G., et al. 2019. *sabinaNSDM*: An R package for spatially nested hierarchical species distribution modelling. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(4), 590–598. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13119>
- Mateo, R. G., et al. 2024. *sabinaNSDM*: An R package for spatially nested hierarchical species distribution modelling. *Methods in Ecology and Evolution*. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.14417>
- Ribalaygua, J., Torres, L., Pórtoles, J., Monjo, R., Gaitán, E., & Pino, M. R. 2013. Description and validation of a two-step analogue/regression downscaling method. *Theoretical and Applied Climatology*, 114(1–2), 253–269. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0836-x>
- Thuiller, W., et al. 2023. N-SDM: A high-performance computing pipeline for Nested Species Distribution Modelling. *Ecography*. <https://doi.org/10.1111/ecog.06540>

## Anexo II. Directrices técnicas (OE2).

En este Anexo se aporta información detallada sobre las directrices técnicas para mejorar de IFV mediante plantaciones.

### Selección de especies

Tradicionalmente, la principal estrategia para una correcta selección de especies es realizar inventarios florísticos en zonas cercanas al área de plantación o en los ecosistemas de referencia próximos, es decir, remanentes de vegetación natural o seminatural de la zona relativamente bien conservados, así como contar con la asesoría de expertos en flora y fauna locales (Gastón *et al.*, 2014).

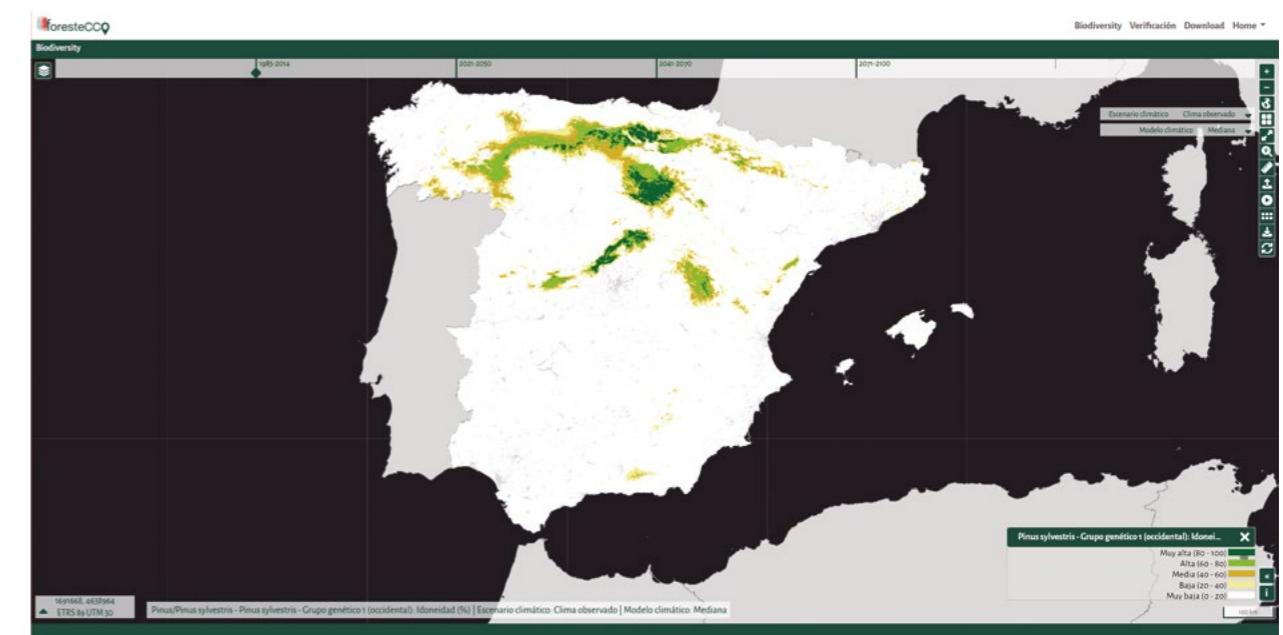
Como apoyo a los inventarios florísticos in situ, o cuando estos no están disponibles o no son posibles, existen otras herramientas que pueden ayudar en esta fase del proyecto, como bibliografía relevante o herramientas online. Por ejemplo, la plataforma AgreTTos, desarrollada por FIRE, es una herramienta en línea que ayuda a seleccionar especies para la plantación de setos multifuncionales basándose en la ubicación, el tipo de cultivo y el servicio ecosistémico que se desea potenciar (polinización, control de plagas, control de la erosión y fijación de nitrógeno). Otras plataformas relevantes para la selección de especies son Anthos, el GBIF o Flora Vascular. También existen aplicaciones basadas en modelos de distribución de especies como el programa ModERForest, que ofrece, entre otras utilidades, la posibilidad de seleccionar las especies más adecuadas para ser utilizados en proyectos de restauración forestal a escala local o regional, entre los 22 taxones o formaciones más importantes de España, basándose en criterios ecológicos y en información fisiográfica, climática y edáfica (López-Senespleda, 2023).

Sin embargo, en el contexto de cambio climático, es importante tener en cuenta cómo cambiará la distribución geográfica de las especies, sobre todo para aquellas especies con nichos ecológicos reducidos o que se encuentren en el límite de su distribución geográfica en la actualidad. El proyecto ForesteCCo responde a esta necesidad con la creación del [visor onlin ForesteCCo](#), que integra modelos de distribución de especies forestales y grupos genéticos bajo escenarios de clima futuro. Esta herramienta permite una selección de especies arbóreas y grupos genéticos en función de su idoneidad futura en cada lugar según las proyecciones climáticas, lo que facilita la planificación de acciones de restauración y reforestación más adaptadas a las condiciones esperadas.

A su vez, la modelización de grupos genéticos aporta información valiosa para el posible uso de semillas o plantas procedentes de poblaciones actualmente adaptadas a condiciones climáticas semejantes a las que se prevén en el futuro para un área determinada. Siempre que la normativa lo permita y exista material de base disponible, esta práctica puede evitar el reemplazo de especies, contribuyendo a conservar el paisaje tradicional, reduciendo posibles impactos socioeconómicos negativos.

El visor ForesteCCo facilita la toma de decisiones al integrar información espacial y climática de manera visual, interactiva y comparativa. Tiene dos funcionalidades principales:

Por un lado, permite la selección de especies y grupos genéticos presentando los mapas de distribución tanto actual como futura para distintos horizontes temporales y SSPs ([Figura 2A](#)).



**Figura 2A.** Imagen del visor con un ejemplo de la idoneidad (%) de *Juniperus oxycedrus* para el escenario climático optimista SPP 2 - 4.5, modelo climático Mediana para el periodo 2041-2070.

Por otro lado, permite la selección de un punto determinado del territorio y solicitar la generación y descarga de información detallada de las especies con idoneidad para ese punto, pudiendo ordenarlas por el porcentaje de su idoneidad actual o por la idoneidad prevista para el futuro ([Figura 3A](#)). Aporta información del porcentaje de modelos climáticos que pronostican idoneidad para cada uno de los períodos temporales y SSPs, así como otros datos como la idoneidad de la mediana, de los percentiles 25 y 75, el punto de corte, la idoneidad actual y la presencia o ausencia de la especie en la actualidad.

Royo, El (522888, 4649828, 1628 msnm)		Presencias: <i>Ilex aquifolium</i> , <i>Sorbus aria</i>															
		2021/2050 2041/2070 2071/2100															
especie / grupo genético		3 pc ia			2021/2050				2041/2070				2071/2100				
					SSP1-2.6 muy optimista	SSP2-4.5 optimista	SSP3-7.0 pesimista	SSP5-8.5 muy pesimista	SSP1-2.6 muy optimista	SSP2-4.5 optimista	SSP3-7.0 pesimista	SSP5-8.5 muy pesimista	SSP1-2.6 muy optimista	SSP2-4.5 optimista	SSP3-7.0 pesimista	SSP5-8.5 muy pesimista	
<i>Ilex aquifolium</i>	sí	56	75	%mcp1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	40	10
<i>Ilex aquifolium</i>	sí	75	ip25	im ip75	66 68 71	68 69 74	67 68 72	68 70 72	67 71 72	68 69 71	67 68 74	64 66 70	65 67 71	66 68 71	45 48 61	30 34 44	
<i>Sorbus aria</i>	sí	51	74	%mcp1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	80	30	10
<i>Sorbus aria</i>	sí	74	ip25	im ip75	65 67 70	67 68 71	63 67 69	65 65 67	63 64 68	60 63 67	56 60 65	51 54 62	60 63 67	52 55 62	30 39 51	11 24 34	
<i>Quercus pubescens</i>	no	52	10	%mcp1	0	0	10	30	10	20	40	60	20	50	70	70	
<i>Pinus uncinata</i>	no	51	55	%mcp1	70	50	50	40	30	10	0	0	40	0	0	0	
<i>Fraxinus excelsior</i>	no	72	46	%mcp1	0	0	10	0	0	10	0	0	0	10	0	10	20
<i>Populus nigra</i>	no	51	6	%mcp1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
<i>Abies alba</i>	no	63	9	%mcp1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Juglans regia</i>	no	33	7	%mcp1	9 9 11	9 9 11	10 10 11	10 10 11	9 11 13	10 11 14	12 14 17	14 15 19	9 10 14	14 16 20	21 21 22	20 21 23	
<i>Tamarix gallica</i>	no	51	0	%mcp1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Pinus nigra</i> - Grupo genético 2 (centro)	no	60	4	%mcp1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Pinus pinaster</i> - Grupo genético 3 (España oriental)	no	54	4	%mcp1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Quercus ilex</i> - Grupo genético 2 (Sierra Morena oriental-Alicante)	no	64	8	%mcp1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
					ip25	im ip75	3 3 3	3 3 3	3 3 3	3 3 3	3 3 3	3 3 3	3 4 4	3 3 3	3 4 7	5 8 11	9 11 12

Figura 3A. Ejemplo de informe generado por el visor con el orden de las especies según la idoneidad futura en el municipio de Cebreros.

Esto permite evaluar distintos horizontes temporales, comparar escenarios, gestionar la incertidumbre y diseñar estrategias de adaptación más robustas. En definitiva, esta herramienta se consolida como un recurso clave para investigadores, gestores forestales y responsables de políticas ambientales, promoviendo restauraciones más efectivas, informadas y resilientes frente al cambio climático.

Existen otros visores como el geoportal [SABINA](#), que integra predicciones de distribución potencial de especies forestales con una resolución espacial de 1 km, tanto para el escenario climático actual como para cuatro escenarios futuros. Este visor, además de incluir las principales especies arbóreas, también representa la distribución de algunos de los arbustos más característicos de la península ibérica.

Los proyectos de restauración forestal deben concebir el bosque como un sistema funcional y estructuralmente complejo, evitando plantaciones monoespecíficas e incluyendo no solo las especies arbóreas, sino también las de otros estratos de vegetación, como los arbustos de distintos tamaños (Colmena *et al.*, 2021).

Los principales criterios generales que deben ser tenidos en cuenta en la selección de especies son (Rey Benayas *et al.*, 2016):

- **Adecuación al territorio en el que van a ser establecidas.** Es necesario utilizar especies que estén adaptadas a la región biogeográfica y ecológica de actuación y al cambio climático, ya que el régimen de temperaturas y precipitaciones y las características del suelo determinarán, en gran medida, la supervivencia de la plántula.
- **Adecuación al emplazamiento concreto.** A pequeña escala, es interesante considerar el micrositio o microambiente donde van a ser plantadas las especies. Las condiciones ambientales en las que se encuentra una planta durante su desarrollo pueden variar notablemente con respecto a las generales del territorio en función de características tales como la orientación (solana/umbría), el tipo y la profundidad del suelo, la pendiente, la exposición al viento y el riesgo de encharcamiento, entre otras.

- **Rusticidad.** Es recomendable utilizar especies que puedan establecerse con un mantenimiento mínimo, economizando recursos humanos, materiales y financieros. El fin último es conseguir corredores verdes que no necesiten mantenimiento en el largo plazo.
- **Disponibilidad en vivero.** La disponibilidad en vivero de las especies es un factor limitante que determinará la selección final que se utilizará. La mejora, restauración y ampliación de la IFV requiere de una planificación que permita reservar la planta con antelación, garantizando su disponibilidad en el momento de la plantación. La cercanía de un vivero a la zona de actuación, aunque puede ser interesante, no es condición de que el material genético proceda de localidades cercanas, ya que a menudo hay intercambios de semillas entre viveros, ni de que estas sean las procedencias más adecuadas en el escenario climático futuro. Sin embargo, sí es recomendable que las condiciones climáticas de producción de la planta sean parecidas a la zona de establecimiento, que los viveros cumplan los criterios de calidad y que la planta esté mínimamente endurecida.

## Material de revegetación

Se recomienda el uso de plantas en alveolos forestales de 200 a 325 cm<sup>3</sup> de una o dos savias de edad y endurecidas en el vivero. Esto facilita la logística y la conservación de las plantas desde su recepción hasta su plantación en campo.

Las plantaciones pueden reforzarse con siembras de ecotipos locales o adaptados a las condiciones climáticas futuras. Por ejemplo, la siembra de las quercíneas, respecto a la plantación, favorece un mejor desarrollo de la raíz pivotante y es una estrategia barata que, si es exitosa, da lugar a árboles de mejor crecimiento y mayor longevidad que las plantaciones (Rey Benayas *et al.*, 2025b).

Idealmente, el material de reproducción se conseguirá en lugares próximos a las zonas de plantación porque es más probable que las semillas utilizadas para su producción sean de ecotipos locales y que las plántulas producidas estén ya adaptadas a las características, sobre todo las climáticas, del territorio. Sin embargo, en el contexto de cambio climático, puede ser interesante considerar distintas procedencias de las especies utilizadas. El visor creado en el marco del proyecto ForesteCCo ayudará a tomar decisiones en este respecto.

La calidad de la planta es uno de los aspectos básicos que determinará el éxito de las plantaciones. Se entiende por calidad aquellas características funcionales que propician que la planta alcance un desarrollo óptimo (supervivencia y crecimiento) en un medio determinado de acuerdo con los objetivos perseguidos en la revegetación. La calidad de la planta resulta de cuatro componentes: (1)

el genético (procedencia de los materiales de reproducción), (2) el morfológico (daños, heridas y forma), (3) el fisiológico y (4) el sanitario (Villar, 2003).

En relación con el componente genético, el [Real Decreto 289/2003](#), de 7 de marzo, sobre comercialización de los materiales forestales de reproducción, y su modificación por el Real Decreto 1220/2011, de 5 de septiembre, regulan en España la obtención y comercialización de los frutos, semillas, partes de plantas y plantas, lo que se denomina “materiales forestales de reproducción” (MFR), con el fin de garantizar la identidad y el origen de los materiales de reproducción de algunas especies forestales (las incluidas en el anexo del decreto). La normativa se aplica a la producción con vistas a la comercialización y a la comercialización de esos materiales, que son utilizados, entre otras aplicaciones, en reforestaciones. Para garantizar la adecuación de los MFR a las condiciones ecológicas de los lugares de plantación, se han publicado las Regiones de Procedencia de varias especies en la Resolución de 28 de julio de 2009, de la *Dirección General de Recursos Agrícolas y Ganaderos*, por la que se autoriza y publica el *Catálogo Nacional de las Regiones de Procedencia relativa a diversas especies forestales* ([BOE. N° 224, de 16.09.09](#)).

Estas Regiones constituyen una parte del territorio ecológicamente uniforme, donde las poblaciones de dichas especies (masas, rodales o fuentes semilleras) presentan unas características fenotípicas y genéticas semejantes, teniendo en cuenta el aislamiento geográfico y las diferencias ecológicas. Como en muchos casos no es posible o es muy complicado definir Regiones de Procedencia, para otras especies leñosas se emplean las denominadas Regiones de Identificación y Utilización (RIU), que representan unidades geográficas ecológicamente homogéneas que facilitan la identificación y uso del material de reproducción. Las RIUs son comunes para todas las especies, y se basan en la definición de unidades geográficas ecológicamente homogéneas, donde se asume que las poblaciones de una especie presentan un comportamiento y adaptación similares. Existe un Sistema de Información de Especies Forestales (SIG-FOREST) elaborado por el INIA-CIFOR en colaboración con el MITECO que proporciona visores y herramientas cartográficas para consultar la distribución de especies y las regiones de procedencia.

Sin embargo, a la hora de planificar una restauración ecológica teniendo en cuenta los escenarios climáticos futuros, es conveniente considerar que las futuras condiciones climáticas no sólo pueden ser compatibles para especies de latitudes y altitudes más bajas, sino también para especies presentes en la actualidad empleando semillas de otras regiones de procedencia.

## Distribución espacial de las plantaciones

Para facilitar la distribución de las especies en el área de intervención puede diseñarse un módulo de plantación, es decir, un esquema que refleje la posición donde va a plantarse cada especie. Sin embargo, especialmente en grandes

plantaciones y cuando estamos trabajando con varias especies distintas, puede ser más efectivo distribuir las plantas *in situ* para favorecer un patrón más al azar del conjunto de plantas, con una mayor heterogeneidad e imitando lo que sucedería en la naturaleza.

En el caso de los corredores forestales, ya sean lineales o en forma de isla, se recomienda una densidad de plantación de unos 1.000 pies por hectárea. Esta densidad inicial, una vez restada la mortalidad de las plantas introducidas y añadido el reclutamiento espontáneo que se produzca a lo largo del tiempo, puede resultar en una masa forestal establecida de 500-800 pies por hectárea, similar a la que encontrariamos en un bosque natural de madurez incipiente.

## Ejecución de las plantaciones

La fecha de plantación es uno de los principales condicionantes del establecimiento de las plántulas, especialmente teniendo en cuenta que la mayoría de las veces los cuidados post-plantación serán mínimos. En general, nunca debe plantarse en los períodos secos y cálidos del año, ni tampoco cuando hiela. La ventana óptima de plantación será ligeramente distinta en función de las condiciones climáticas del área de actuación y, en general, se está viendo reducida como consecuencia del cambio climático (periodos secos y cálidos prolongados).

## Ajuste del diseño de la plantación en el terreno

El ajuste del diseño de la plantación en el terreno o replanteo consiste en marcar en el campo el diseño producido en gabinete y ajustarlo *in situ* si procede mediante el uso de estacas, jalones u otros materiales. El trabajo en el terreno está sometido a ciertos imprevistos que pueden afectar a la cantidad de planta estimada inicialmente, por ejemplo, debido a condicionantes del terreno como la pendiente, la pedregosidad o el riesgo de erosión. En general, se intentará respetar la distribución prevista (irregular, en setos, bosquetes, etc.) y optimizar el espacio disponible para un correcto desarrollo de las plántulas. En resumen, el replanteo es el paso intermedio entre el diseño y la ejecución de la plantación, y garantiza que las actuaciones de restauración se realicen conforme a los objetivos técnicos, ecológicos y logísticos previstos.

## Preparación del terreno

La preparación del terreno antes de la plantación tiene como fin mejorar algunas propiedades del suelo para facilitar la plantación y el establecimiento de las plantas. La compactación o pedregosidad, o incluso la presencia de una cubierta herbácea densa, puede hacer convenientes labores con maquinaria previas a la plantación. Existen diferentes técnicas de preparación del terreno, cuya

elección dependerá del tipo de suelo, del tipo y alcance de la plantación y de los recursos disponibles, entre otros factores. El hoyo de plantación debe abrirse en el momento de la plantación para evitar su desecación; puede hacerse de forma manual con azadas o mecanizada mediante una moto-ahoyadora. El ahoyado mecánico genera hoyos más profundos y puede ser interesante en la plantación de islotes forestales grandes y, sobre todo, si se usan plántulas de mayor tamaño. Los hoyos deben ser lo suficientemente grandes como para que el cepellón entre por completo, tanto en profundidad como en anchura, siendo de al menos una vez y media la altura y anchura de este. El objetivo es tener un volumen de tierra mullida con el que llenar el hoyo de plantación, de forma que la planta pueda expandir con éxito su sistema radicular.

## Plantación

La plántula debe colocarse verticalmente en el hoyo de plantación, cubriendo completamente el cepellón con tierra para evitar su exposición al aire, lo que podría provocar su desecación. Es fundamental asegurar una buena conexión hidráulica entre el cepellón y el suelo circundante.

Al llenar el hoyo, deben evitarse piedras grandes o restos de vegetación herbácea, ya que podrían interferir en el desarrollo de la planta al dificultar la penetración de su sistema radicular. Una vez llenado, el sustrato debe compactarse ligeramente para eliminar los macroporos por la remoción de suelo, que puedan desecar el cepellón. Por último, se recomienda formar un pequeño alcorque alrededor de la planta para favorecer la infiltración y retención del agua de lluvia o riego, evitando su pérdida por escorrentía.

## Colocación de protectores

La presencia de herbívoros (conejo, corzo y jabalí, principalmente) a menudo compromete la supervivencia de las plantas. Para evitarlo, se pueden colocar protectores individuales, muy útiles frente a los conejos, o vallar perimetralmente las plantaciones. Esta segunda opción, aunque más cara, puede ser interesante cuando existe presión por herbívoros de mayores tamaños como ungulados o ganado, frente a los que los protectores individuales pueden no ser suficientemente resistentes.

Se recomienda el uso de tubos o mallas protectoras individuales, que se fijan con tutores de bambú y tiras plásticas. Se recomienda el tubo microperforado para las plantas que necesitan sombra para su establecimiento inicial, y el de malla menos densa, que no reduzca de manera muy significativa la luz, para las especies heliófilas como son muchos caméfitos y arbustos o árboles pioneros. En el primer caso, la sombra proporcionada a las plantas reduce los efectos de

la insolación directa (fotoinhibición) y de sus consecuencias en la transpiración y evaporación del agua del suelo, el efecto desecador del aire, la abrasión por partículas arrastradas por el viento y el riesgo de heladas (Oliet *et al.* 2019).

A su vez, favorecen el desarrollo aéreo vertical de la planta, por lo que son de gran utilidad para el crecimiento de árboles, especialmente de los de hoja ancha y que suelen establecerse a la sombra de otras plantas. Sin embargo, en algunas especies de arbustos, especialmente los de menor talla, el uso de tubos protectores constriñe el desarrollo lateral de sus ramas y tallos. Este es el caso de plantas heliófilas tales como retamas, romeros y aulagas, entre otras.

Como recomendación general, los protectores deben mantenerse siempre que las plantas puedan ser dañadas y su viabilidad comprometida por los herbívoros, lo que puede tardar varios años, especialmente en ecosistemas mediterráneos secos donde el crecimiento es más lento. Deben ser retirados cuando la planta se ha establecido y el tallo ha engrosado y significado lo suficiente para mantenerlas erectas. Además, los protectores se degradan, presentando los de polipropileno una vida útil de aproximadamente cinco años, momento a partir del cual su deterioro es patente, por lo que es recomendable planificar su revisión y retirada. Esta última es importante para evitar los efectos adversos de contaminación por plástico en los campos donde hemos plantado y en los campos vecinos. Los protectores retirados que se encuentren en buen estado, como frecuentemente ocurre con las mallas, serán utilizados en otras plantaciones, alargando la vida útil del producto y promoviendo la reducción y reutilización de recursos.

## Mantenimiento de las plantaciones

La mejora y restauración de la IFV debe tener en cuenta que, debido a que los recursos son limitados, el mantenimiento de las plantaciones será prácticamente nulo aproximadamente tras 3-5 años de la plantación. Sin embargo, durante los primeros años existen una serie de cuidados que pueden incrementar significativamente el éxito de las plantaciones. A continuación, se describen las principales actuaciones recomendadas en esta fase inicial. Es importante resaltar que estos cuidados son los ideales para garantizar el éxito de las plantaciones, pero a menudo no pueden ser implementados por el coste que suponen.

- **Riego.** El riego de establecimiento solo se considerará cuando el suelo esté muy seco en el momento de la plantación o no llueve en las semanas siguientes a esta y siempre que existan los recursos disponibles para ello. Se recomienda una cantidad de agua de unos 5-10 L por planta. El objetivo de este riego es eliminar el espacio poroso lleno de aire, además de aportar el recurso hídrico necesario para activar el desarrollo radicular antes de la llegada de las bajas temperaturas invernales o las posibles altas temperaturas primaverales. En

cualquier caso, lo más importante es ejecutar las plantaciones en las fechas recomendadas, ajustándose a la pluviometría de ese año.

- **Control de la competencia.** El crecimiento de las hierbas espontáneas, principalmente las anuales, es más rápido y vigoroso que el de los árboles y arbustos plantados, presentando las primeras un desarrollo radicular con numerosas raíces en cabellera que forman una malla muy densa en los primeros 15-20 cm de suelo. Así, las hierbas pueden competir fuertemente por el agua, los nutrientes y la luz con las plántulas introducidas que suelen tener uno o dos años. Limitar esta competencia durante la primavera es una labor importante para favorecer el éxito inicial de las plantaciones. La eliminación de hierbas es particularmente necesaria el año de la plantación y recomendable los dos o tres años siguientes, hasta que las plantas alcancen el tamaño suficiente para liberarse, al menos en parte, de su competencia tanto subterránea como aérea.

La eliminación de hierbas debe realizarse antes de que hayan producido semillas, con el fin de disminuir su proliferación al año siguiente. Del mismo modo, tampoco se debe realizar demasiado pronto, al inicio de la primavera, porque las hierbas tendrían tiempo suficiente para volver a completar su ciclo de crecimiento durante esa misma temporada. Generalmente, se realizará un desbroce mecánico con desbrozadora de hilo o escarpe manual con azada alrededor de cada ejemplar, rompiendo la capa de suelo más superficial y la capilaridad y conexión con la capa de suelo más profundo, reduciendo así la pérdida de humedad en profundidad. El desbroce se realizará al final de la época de lluvias primaverales, generalmente finales de abril o inicios de mayo.

- **Reposición de marras.** La revisión del establecimiento de las plantas introducidas es una labor importante para evaluar el éxito de las plantaciones y para detectar posibles errores o factores limitantes de los que aprender para el futuro. Se recomienda reponer las marras una única vez pasados al menos dos veranos desde la plantación original, siempre dependiendo de la tasa de supervivencia obtenida. En general, se recomienda una reposición de marras cuando la supervivencia se encuentre por debajo del 70%.



## Referencias

- Colmena, G.; Colomina, D.; Melero, M; y otros. 2021. *Manual de restauración forestal*. WWF España.
- Gastón, A., García-Viñas, J. I., Bravo-Fernández, A. J., López-Leiva, C., Oliet, J. A., Roig, S., & Serrada, R. (2014). Species distribution models applied to plant species selection in forest restoration: are model predictions comparable to expert opinion? *New Forests*, 45(5), 641-653. <https://doi.org/10.1007/s11056-014-9427-7>
- López-Senespleda, E; Alonso-Ponce, R; Ruiz-Peinado, R; Gómez, V; Serrada, R; Montero, G (2023). ModERFoRest: A new software for assessing the environmental performance of forest species. *Forest Systems*, Volume 32, Issue 1, eRC01.<https://doi.org/10.5424/fs/2023321-19406>
- Oliet, J. A., Blasco, R., Valenzuela, P. & Puértolas, J. 2019. Should we use meshes or solid tube shelters when planting in Mediterranean semiarid environments? *New Forests*, 50(2):267-282. <https://doi.org/10.1007/s11056-018-9659-z>
- Rey Benayas, J.M., Gómez Crespo, J.I., & Mesa Fraile, A.V. 2016. *Guía para la plantación de setos e islotes forestales en campos agrícolas mediterráneos*. Fundación Internacional para la Restauración de Ecosistemas, Madrid.
- Rey Benayas, J. M., Bullock, J. M., & Pereira, H. M. 2025b. A multi-scale approach to integrating rewilding into agricultural landscapes. *Frontiers In Ecology And The Environment*. <https://doi.org/10.1002/fee.2860>
- Villar Salvador, P. 2003. Importancia de la calidad de planta en proyectos de revegetación. En: Rey Benayas, J.M., Espigares,T., Nicolau, J.M. (eds.). Restauración de Ecosistemas Mediterráneos. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, pp. 65-86.

