

CONAMA 2024

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

Herramienta de restauración nacional considerando la conectividad y la vulnerabilidad al cambio climático



CONAMA 2024

HERRAMIENTA DE RESTAURACIÓN NACIONAL CONSIDERANDO CONECTIVIDAD Y VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO

Autor Principal: Teresa Goicolea (Universidad Autónoma de Madrid)

Otros autores: Jennifer Morales-Barbero (Universidad Autónoma de Madrid); Juan Ignacio García-Viñas (Universidad Politécnica de Madrid); Aitor Gastón (Universidad Politécnica de Madrid); María José Aroca-Fernández (Universidad Politécnica de Madrid); Juan Antonio Calleja (Universidad Autónoma de Madrid); Santiago Saura (Universidad Politécnica de Madrid); Alejandra Zarzo Arias (Universidad Autónoma de Madrid); Juan Carlos Moreno Saiz (Universidad Autónoma de Madrid); Miguel Ángel Rodríguez (Universidad de Alcalá); Rubén G. Mateo (Universidad Autónoma de Madrid)

CONAMA 2024

HERRAMIENTA DE RESTAURACIÓN NACIONAL CONSIDERANDO CONECTIVIDAD Y VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO

ÍNDICE

1. [Título](#)
2. [Resumen](#)
3. [Introducción](#)
4. [Funcionalidades del geoportal SABINA](#)
5. [Aplicaciones](#)
6. [Metodología](#)
7. [Resultados destacables](#)
8. [Conclusiones](#)
9. [Financiación](#)
10. [Bibliografía](#)

RESUMEN

La creciente vulnerabilidad de la biodiversidad en España, exacerbada por el cambio climático, exige iniciativas innovadoras de restauración ecológica. Para guiar estas acciones, proponemos una herramienta multidisciplinaria y espacialmente explícita accesible a través del sitio web interactivo <https://geosabina.com>. Esta herramienta identifica las especies de plantas leñosas recomendadas para la restauración ecológica en cada punto de la España peninsular, y localiza las áreas prioritarias de acción. La herramienta integra datos sobre la distribución potencial de 250 especies de árboles y arbustos autóctonos, sobre la conectividad ecológica y sobre la vulnerabilidad al cambio climático.

Para identificar las especies idóneas para los proyectos de restauración ecológica, la herramienta se basa en modelos de distribución de especies jerárquicos y de consenso, que combinan múltiples algoritmos estadísticos y dos escalas geográficas. Además, los modelos se proyectan bajo cuatro escenarios de cambio climático, permitiendo una planificación adaptativa. Utilizamos el nuevo paquete de R `sabinaNSDM` para implementar estos modelos y comparar su efectividad con modelos tradicionales no jerárquicos. Los modelos jerárquicos resultantes muestran una alta capacidad predictiva ($AUC > 0.8$), y superaron a los métodos no jerárquicos en rendimiento predictivo, al tiempo que mitigaron problemas de truncamiento de nicho y extrapolación.

Paralelamente, la identificación de zonas prioritarias de acción se basa en análisis de conectividad del paisaje en la actualidad y en los escenarios futuros para las especies asociadas a los bosques de cada tipo de vegetación (caducifolio, coníferas de montaña,

CONAMA 2024

HERRAMIENTA DE RESTAURACIÓN NACIONAL CONSIDERANDO CONECTIVIDAD Y VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO

hiperxerófilo, vegetación de alta montaña, esclerófilo y subesclerófilo) de la España peninsular. Nuestro análisis tiene en cuenta la distribución potencial de los diferentes tipos de vegetación, la influencia de la matriz del paisaje y la capacidad de dispersión de las especies para evaluar los patrones de conectividad. Los índices de conectividad basados en el concepto de disponibilidad de hábitat nos permiten proponer una red de conservación formada por las áreas y corredores críticos que más contribuyan a la dispersión presente y futura de las diferentes especies u otros flujos ecológicos asociados a los bosques. Los resultados reflejan cambios importantes en la distribución de los bosques de todos los tipos de vegetación, con desplazamientos significativos hacia el norte, el este y mayores altitudes. Los impactos negativos (disminución en superficie forestal y conectividad) más acusados se obtuvieron para las especies adaptadas a condiciones frías o húmedas (como las caducifolias, coníferas de montaña y vegetación de alta montaña). En cambio, las especies asociadas a los tipos de vegetación adaptados a condiciones cálidas y secas (como la vegetación esclerófila, subesclerófila e hiperxerófila) mostraron una expansión en su área de distribución potencial y conectividad. La eficacia de las áreas protegidas actuales para mantener la conectividad varía según la región, cubriendo el 45% del total de áreas de conservación propuestas en este estudio, pero menos del 7% en las zonas de vegetación caducifolia.

Al integrar los modelos de distribución de especies, de conectividad ecológica, y el conocimiento de expertos, el geoportal SABINA identifica de manera precisa y objetiva áreas y especies prioritarias para la restauración. A su vez, al considerar los posibles efectos del cambio climático, permite guiar medidas adaptativas. Los resultados de este trabajo están disponibles públicamente, facilitando su uso para guiar estrategias efectivas de restauración y gestión del territorio, y entre ellos, en particular, contribuir a orientar el Plan Nacional de Restauración que ha de elaborar España en el marco del recientemente aprobado Reglamento de Restauración de la Naturaleza de la UE.

1. INTRODUCCIÓN

La **restauración ecológica** es una herramienta clave para combatir la pérdida de biodiversidad y la degradación de los paisajes en el actual contexto de cambio climático acelerado (European Parliament, 2024). Los cambios de usos del suelo y la sobreexplotación de los recursos son los principales factores detrás de la reciente pérdida de biodiversidad y degradación de los ecosistemas (Jaureguiberry et al., 2022). Además, el cambio climático ha intensificado la aridez y la frecuencia de fenómenos climáticos extremos, como olas de calor y sequías prolongadas, lo que a su vez incrementa la vulnerabilidad de los ecosistemas (IPBES, 2019; IPCC, 2023). La Comisión Europea reconoce que la conservación y ampliación de la actual red de espacios protegidos no es suficiente, señalando la importancia de adicionalmente restaurar los ecosistemas para asegurar su recuperación, frenar la pérdida de biodiversidad y fomentar la mitigación y adaptación al cambio climático (European Commission, 2020). Por ello, ha aprobado en 2024 la Ley de Restauración de la Naturaleza (Reglamento (UE) 2024/1991) con la que urge a los estados miembros a elaborar planes nacionales de restauración en el plazo de dos años y a restaurar el 20% del territorio europeo para 2030 y todos los sistemas degradados para 2050 (European Parliament, 2024). En este sentido, se identifican a los bosques como uno de los principales objetivos a restaurar dada su gran riqueza y su importante rol como

CONAMA 2024

HERRAMIENTA DE RESTAURACIÓN NACIONAL CONSIDERANDO CONECTIVIDAD Y VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO

proveedores de servicios, y en la adaptación y mitigación del cambio climático (European Commission, 2021; Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2024). A pesar del gran paso que ha dado la Unión Europea, creando la primera ley a nivel continental de este tipo, todavía quedan por definir las estrategias que debe seguir cada nación para su cumplimiento. Por ello, herramientas que ayuden a responder dónde y cómo se debe restaurar para afrontar las principales amenazas y revertir la degradación de la naturaleza son de especial relevancia en la actualidad.

La **conectividad ecológica** destaca como uno de los pilares esenciales para fortalecer la funcionalidad, integridad y resiliencia de los ecosistemas frente al cambio climático (Correa Ayram et al., 2015; Hilty et al., 2020; Taylor et al., 1993). Su importancia radica en que permite a las especies dispersarse hacia nuevas áreas de distribución y facilita el intercambio genético, cuestiones fundamentales para que las poblaciones puedan acceder a nuevas áreas con condiciones adecuadas o adaptarse a nuevos ambientes como respuesta al cambio climático (Theodoridis et al., 2018). Por lo tanto, es vital priorizar áreas de conservación y restauración que incluyan áreas y corredores clave para promover la conectividad, incrementando así la resiliencia de los ecosistemas ante los desafíos del cambio climático (Hilty et al., 2020; Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, 2021).

A pesar de los drásticos **cambios climáticos** predichos y su impacto en la biodiversidad, la salud, y la conectividad de los ecosistemas (IPBES, 2019; IPCC, 2023), la mayoría de las estrategias de conservación y restauración actuales siguen utilizando frecuentemente enfoques estáticos que no contemplan la adaptación a escenarios climáticos futuros. Estudios previos han demostrado que las medidas de conservación y restauración definidas solo por el estado actual de los paisajes no logran identificar los elementos relevantes para la disponibilidad de hábitat y la conectividad en otros períodos de tiempo (Goicolea & Mateo-Sánchez, 2022; Jennings et al., 2020; Saura et al., 2011). Por ello, la gestión adaptativa de la biodiversidad requiere medidas basadas en análisis que consideren los efectos del cambio climático sobre las especies y los ecosistemas. En este contexto, un desafío importante es proporcionar a los gestores herramientas dinámicas que incorporen criterios de vulnerabilidad al cambio climático en la planificación territorial y restauración ecológica.

En este sentido, los **modelos ecológicos** tales como modelos de distribución de especies (Zurell et al., 2020) y de conectividad (Hilty et al., 2020; Kool et al., 2013) son excelentes herramientas para complementar otras fuentes de información (tales como el criterio experto, las observaciones de campo, o los datos de teledetección). Estos modelos ofrecen información objetiva, basada en criterios cuantitativos, pero, sobre todo, proyectable a otros períodos de tiempo, lo cual los convierte en un recurso ideal para incorporar información del cambio climático en los proyectos de gestión ecológica. Dado el acelerado ritmo del cambio ambiental, la **actualización** de modelos ecológicos existentes con nuevos datos es esencial para maximizar su impacto y lograr resultados duraderos. Además, los avances científicos y tecnológicos permiten actualizar modelos existentes (Felicísimo et al., 2011) con técnicas y variables más sofisticadas y recientes, generando predicciones más robustas y de mayor resolución espacial.

España es un escenario particularmente adecuado para los estudios de restauración ecológica adaptada al cambio climático debido a su alta diversidad de ecosistemas que permite evaluar los efectos del cambio climático en una amplia gama de condiciones ambientales.

CONAMA 2024

HERRAMIENTA DE RESTAURACIÓN NACIONAL CONSIDERANDO CONECTIVIDAD Y VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO

Además, España es un país especialmente vulnerable al cambio climático, con aumentos significativos en la temperatura y cambios en los patrones de precipitación que ya están afectando a la biodiversidad y resiliencia de los ecosistemas (Ribas et al., 2020). El gran abandono agrícola y rural ha llevado a un aumento de las zonas y espacios forestales, lo que genera un contexto particularmente interesante y oportuno para realizar trabajos de restauración ecológica. Muchos de los esfuerzos pasados de restauración, especialmente los desarrollados entre 1939 y 1995 en el marco del Plan General para la Repoblación Forestal en España, dieron lugar a la recuperación de terrenos previamente sometidos a procesos de degradación, pérdida de suelos y desertificación muy acentuados con un alcance y extensión muy superiores a lo conseguido en décadas y años recientes. Estos esfuerzos de restauración de la vegetación leñosa del siglo pasado se llevaron a cabo mayoritariamente a través del establecimiento de bosques densos dominados por coníferas. La inversión posterior en la gestión, mejora, y conservación de esas masas repobladas ha sido generalmente escasa, no permitiendo, por ejemplo, adecuar convenientemente la densidad de pies arbóreos a la evolución de la edad de las masas conforme a las previsiones iniciales y a lo recogido en las prescripciones de la gestión forestal sostenible. Ello ha dificultado una dinámica más rápida de sucesión ecológica y de implantación de una mayor diversidad y ha influido en la vulnerabilidad a perturbaciones relacionadas con el cambio climático de estos espacios restaurados (Clark et al., 2011). Otras restauraciones más recientes y de menor alcance también han mostrado una tendencia a la monoespecificidad y al uso de especies de crecimiento rápido y alóctonas. La transición de estas repoblaciones a bosques cada vez más ricos en especies leñosas autóctonas, podría traer beneficios tanto para la biodiversidad como para la sociedad (Felton et al., 2010). Por ello, es especialmente crucial en España disponer de herramientas que orienten las medidas de restauración y de gestión forestal que permitan una transición hacia bosques cada vez más sanos, diversos, mejor gestionados, funcionales y resilientes frente al cambio climático.

Para abordar estos desafíos, se ha desarrollado el **geoportal SABINA** <https://geosabina.com>. Se trata de una herramienta diseñada para identificar áreas prioritarias y guiar estrategias de restauración adaptadas al cambio climático. Basado en modelos ecológicos innovadores que emplean técnicas estadísticas avanzadas y datos actualizados que predicen la distribución potencial de las especies leñosas, y la conectividad presente y futuras, el geoportal **permite localizar las áreas e identificar las especies idóneas para desarrollar planes de conservación** en la España peninsular.

2. FUNCIONALIDADES DEL GEOPORTAL SABINA

El geoportal SABINA es una herramienta interactiva diseñada para la planificación y gestión ecológica en la España peninsular, ofreciendo una amplia gama de **funcionalidades** orientadas a apoyar la conservación, restauración y planificación forestal. Las principales funcionalidades son:

- **Mapas de distribución potencial de especies leñosas:** Permite **explorar y descargar modelos** de distribución de aproximadamente 250 especies de árboles y arbustos autóctonos en la España peninsular, tanto para el clima actual como para cuatro escenarios climáticos futuros. Los modelos tienen una resolución de 1 km (aunque los modelos de árboles están disponibles a una resolución de 250 m bajo demanda), lo que facilita un análisis detallado de la idoneidad del hábitat a nivel local. Estos mapas se

CONAMA 2024

HERRAMIENTA DE RESTAURACIÓN NACIONAL CONSIDERANDO CONECTIVIDAD Y VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO

basan en modelos que utilizan un innovador enfoque jerárquico anidado que mejora la precisión de las predicciones (Goicolea, Adde, et al., 2024). Los modelos pueden descargarse en formato GeoTIF para su uso en cualquier sistema de información geográfica.

- **Identificación de especies adecuadas para la restauración y diversificación:** El portal permite [seleccionar una ubicación específica](#) y visualizar las especies de árboles y arbustos autóctonos más adecuadas para esa área basándose en los valores de idoneidad de los modelos de distribución de especies. Además, se puede descargar un archivo con los valores de idoneidad para todas las especies en esa ubicación concreta.
- **Ficha detallada de cada especie:** Todas las especies modelizadas cuentan con una [ficha](#) que proporciona información clave sobre su ecología, distribución, características fisiológicas y usos, lo que permite una selección informada para proyectos de restauración. Esta información completa los valores de idoneidad y ayuda a los gestores durante el proceso de toma de decisiones, que no debe basarse exclusivamente en los valores de idoneidad.
- **Identificación de zonas de especial importancia:** Próximamente, el portal facilitará la identificación de zonas de alta vulnerabilidad y alta contribución a la adaptación frente al cambio climático. La identificación se basa en modelos dinámicos de disponibilidad y conectividad de hábitat que consideran los posibles efectos del cambio climático para especies representativas de los distintos tipos de bosques asociados a los principales tipos de vegetación de la España peninsular. Para más detalles, véase la sección de metodología de este texto.
- **Atlas de distribución de plantas y mariposas ibéricas:** El portal permite [visualizar y descargar](#) los datos de presencia registrados para todas las especies de plantas vasculares y de mariposas diurnas de España peninsular. Estos datos están disponibles a una resolución de celdas UTM de 10 km de lado.

3. APLICACIONES

El [geoportal SABINA](#) está disponible para su uso por todo el público, pero está especialmente dirigido a investigadores y gestores forestales y de biodiversidad. El geoportal proporciona información valiosa que puede ser utilizada en diversas aplicaciones prácticas para la conservación y restauración ecológica, por ejemplo:

- **Planificación de la restauración ecológica:** La identificación de áreas prioritarias para la restauración es esencial para maximizar la efectividad de los esfuerzos de restauración. El uso de modelos de distribución de especies y análisis de conectividad permite focalizar los recursos en aquellas áreas donde la restauración puede generar un mayor beneficio ecológico.
- **Conservación adaptativa frente al cambio climático:** Dado que el geoportal SABINA proyecta la distribución y conectividad potenciales de las especies bajo cuatro escenarios climáticos, es posible anticipar los posibles cambios en la idoneidad de las

CONAMA 2024

HERRAMIENTA DE RESTAURACIÓN NACIONAL CONSIDERANDO CONECTIVIDAD Y VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO

especies y ajustar las estrategias de conservación en consecuencia. Por ejemplo, se pueden identificar especies o áreas vulnerables, aquellas que van a permanecer con condiciones adecuadas a lo largo del tiempo, o corredores que favorezcan la migración natural de las especies a sus distribuciones futuras.

- **Integración en políticas de gestión forestal:** La herramienta puede apoyar la planificación diversificación e incremento de la resiliencia y capacidad de adaptación de los espacios forestales, proporcionando información sobre las especies autóctonas más adecuadas para las condiciones climáticas presentes y futuras.
- **Educación y divulgación científica:** Al estar disponible para el público en general, el geoportal SABINA también tiene un valor educativo importante para entender los efectos del cambio climático sobre la biodiversidad y la importancia de la restauración ecológica.

4. METODOLOGÍA

Las distintas funcionalidades del geoportal SABINA se basan en evidencia científica sólida para guiar acciones frente al cambio climático. Para ello se han empleado modelos ecológicos que utilizan técnicas innovadoras y robustas e información de partida actualizada. Los mapas de distribución potencial de las especies leñosas y la identificación de las especies más adecuadas se basan en la implementación de modelos de distribución de especies (Guisan et al., 2017). La identificación de zonas de alta importancia para la conservación se basa en modelos dinámicos de conectividad de hábitats (Zeller et al., 2020). En ambos casos se utilizaron cinco escenarios climáticos: uno presente y cuatro futuros para el periodo 2071-2100 que combinan dos modelos climáticos de circulación global y dos trayectorias socioeconómicas (Cuadro 1). Estos diferentes escenarios permiten evaluar los potenciales efectos del cambio climático y la incertidumbre en esos efectos.

Cuadro 1. Escenarios climáticos futuros considerados

Nombre del escenario	Modelo de circulación global	Trayectoria Socioeconómica Compartida (SSP)
<i>Optimista A</i>	IPSL-CM6A-LR	SSP 126
<i>Optimista B</i>	MRI-ESM2-0	SSP 126
<i>Pesimista A</i>	IPSL-CM6A-LR	SSP 585
<i>Pesimista B</i>	MRI-ESM2-0	SSP 585

4.1. Modelos de distribución de especies

Se desarrollaron modelos de distribución (Guisan et al., 2017) de las especies leñosas (árboles y arbustos) autóctonas más relevantes en la España peninsular en función de variables bioclimáticas, edáficas, hidrológicas y topoclimáticas (Goicolea, Adde, et al., 2024). Para ello se utilizó un **enfoque anidado y jerárquico** (Guisan et al., n.d.; Mateo et al., 2019) que combinan

CONAMA 2024

HERRAMIENTA DE RESTAURACIÓN NACIONAL CONSIDERANDO CONECTIVIDAD Y VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO

múltiples algoritmos estadísticos (Araújo & New, 2006) y dos niveles de análisis: un modelo global y un modelo regional.

- **MODELO GLOBAL:** Este modelo se calibra a una escala amplia que abarca la totalidad de los biomas europeos, utilizando datos climáticos y de presencia de especies con una resolución de 1 km. Pretende representar el nicho climático completo de la especie, evitando problemas el truncamiento del nicho y la extrapolación a condiciones no análogas (Rousseau & Betts, 2022; Scherrer et al., 2021; Thuiller et al., 2004). Los datos de presencia utilizados para entrenar los modelos globales proceden de [GBIF](#), [BIEN](#), y [EUForest](#) revisados mediante filtros y criterio de expertos.
- **MODELO REGIONAL:** Se calibran con una mayor variedad de variables ambientales disponibles a menores escalas, lo que permite capturar la influencia de factores locales, como la topografía y las características del suelo. Los datos provienen de fuentes más precisas específicas de España como el [Inventario Forestal Nacional](#) en el caso de los árboles y el [Mapa Forestal de España](#) en el caso de los arbustos. Además, en el caso de especies de árboles se calibran a una resolución más alta (250 m).

Estos modelos se desarrollaron utilizando el [paquete de R **sabinaNSDM**](#), diseñado por nuestro equipo de investigación (Mateo et al., 2024). Se utilizaron dos estrategias jerárquicas para integrar los resultados de ambos modelos (Adde et al., 2023). La estrategia "*covariate*" añade el resultado del modelo global como una variable adicional en el modelo regional, mientras que la estrategia "*multiply*" calcula la media geométrica de los resultados de ambos modelos. Para más información sobre la metodología, véase Goicolea, Adde, et al., (2024). En el geoportal se muestran los resultados de la opción " covariate ".

4.2. Modelos dinámicos de conectividad

Desarrollamos **modelos de disponibilidad de hábitat y conectividad** para especies con diferentes capacidades dispersivas asociadas a bosques de los principales tipos de vegetación. Para más detalles sobre estos análisis consultar el documento actualmente en preparación Goicolea, Aroca-Fernández, et al., (2024). En primer lugar, se modeló la distribución de los tipos de vegetación en España bajo condiciones climáticas actuales y futuras utilizando el enfoque de clasificación con Random Forest con el paquete R 'randomForest 4.7' (Liaw & Wiener, 2002). El modelo se entrenó con puntos de muestreo clasificados según los tipos climáticos estructurales del Mapa Forestal de España (Ruiz de la Torre J., 1990) y variables bioclimáticas (CHELSA; Karger et al., 2017).

A continuación, se definieron las teselas de hábitat forestal y se delinearon los corredores potenciales entre ellos utilizando el enfoque de caminos de mínimo coste (Adriaensen et al., 2003) considerando la heterogeneidad del paisaje mediante una superficie de resistencia que representa la dificultad de desplazamiento de las especies (Spear et al., 2010; Zeller et al., 2012). La superficie de resistencia se generó considerando datos de uso del suelo, distribución de carreteras y literatura especializada sobre dispersión de mamíferos forestales, seleccionados como "especies indicadoras" representando al resto de especies forestales (Minor & Lookingbill, 2010; Pacifici et al., 2020). Se descartaron teselas pequeñas (área mínima inferior a 5 ha) y los corredores se ensancharon a las dos celdas contiguas para representar gráficamente las rutas de conexión potencial.

Finalmente, la conectividad se evaluó usando índices de disponibilidad y conectividad de hábitat (Saura & Pascual-Hortal, 2007; Saura & Rubio, 2010) y el paquete de R Makurhini (Godínez-Gómez, 2020). Por un lado, se calculó la conectividad general de los diferentes ecosistemas forestales de España en el presente y futuro con el índice de Área Conexa Equivalente (Santini et al., 2016; Saura et al., 2011). Por otro lado, se calculó la contribución de las diferentes teselas de hábitat y corredores para el mantenimiento de la conectividad presente y futura mediante el índice dPC (Saura & Pascual-Hortal, 2007).

Por último, **definimos una red de conservación adaptada al cambio climático**, integrando las teselas y corredores con mayor importancia media (primer cuartil) para las especies forestales con diferentes capacidades dispersivas y bajo las condiciones climáticas presentes y futuras. Además, se evaluó la capacidad de la red actual de espacios protegidos para mantener la conectividad frente al cambio climático calculando su superposición con las áreas protegidas existentes de la Red Natura 2000.

5. RESULTADOS DESTACABLES

Los modelos de distribución de especies se desarrollaron exitosamente con una alta capacidad predictiva (AUC medio de 0.93, sd 0.04 para los modelos “covariate”). Además, los modelos jerárquicos demostraron ser superiores a los modelos de distribución de especies tradicionales tanto en capacidad predictiva como para evitar el truncamiento del nicho y la extrapolación a condiciones no análogas. El principal resultado que se desprende de los modelos de distribución de especies es que el 75% de las especies experimentará una reducción de su distribución de acuerdo a los escenarios de cambio climático considerados para el futuro (Figura 1).

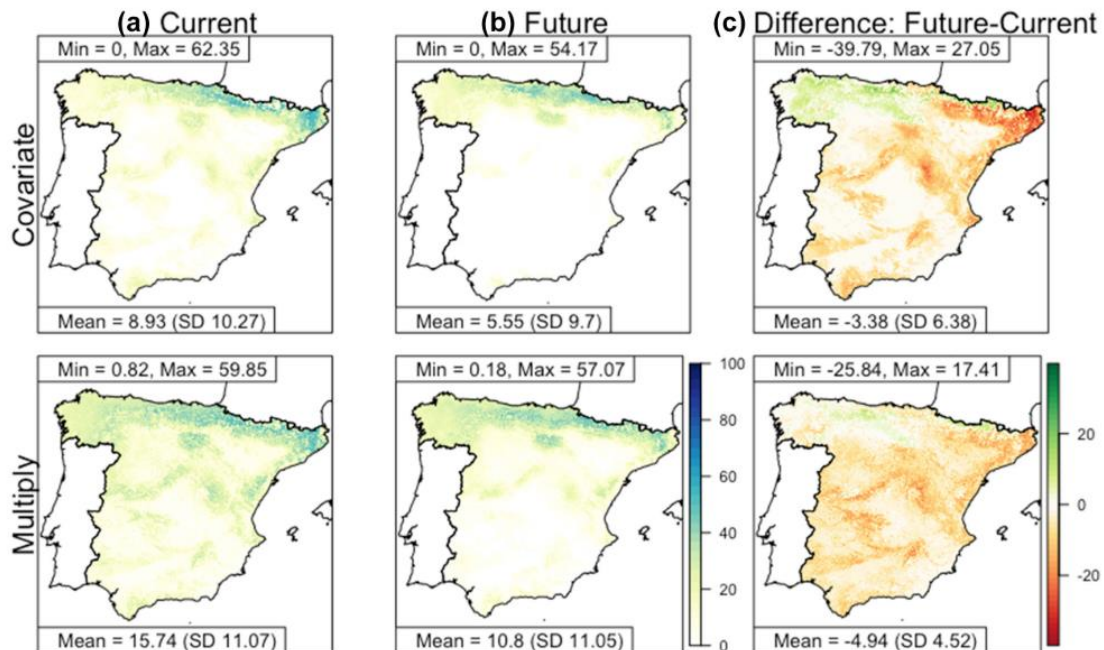


Figura 1. Biodiversidad estimada como la superposición de la idoneidad de todas las especies de árboles bajo condiciones presentes y futuras (periodo 2070-2100) según los modelos jerárquicos “covariate” y “multiply”. Figura tomada de Goicolea, Adde, et al., (2024)

CONAMA 2024

HERRAMIENTA DE RESTAURACIÓN NACIONAL CONSIDERANDO CONECTIVIDAD Y VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO

Los principales tipos de vegetación en la España peninsular fueron modelados con una precisión del 89,5%. Los hallazgos indican cambios sustanciales en la futura distribución de los tipos de bosque, con desplazamientos notables hacia el norte, el este y a mayores altitudes.

Los resultados preliminares de clasificación de los tipos de vegetación y conectividad de sus espacios forestales mostraron efectos importantes en todos los tipos de vegetación. Los cambios más relevantes y negativos se obtuvieron para los tipos adaptados a condiciones frías o húmedas (por ejemplo, caducifolias, coníferas de montaña y vegetación de alta montaña) pues para ellos se predijo una significativa reducción en su área y conectividad. Los tipos de vegetación adaptados a condiciones cálidas y secas (por ejemplo, vegetación esclerófila, subesclerófila, e hiperxerófila) mostraron por el contrario incrementos en sus rangos corológicos y conectividad.

Se delinearon las zonas prioritarias a conservar por su alta contribución a la conectividad actual y futura. Los resultados preliminares muestran que la adecuación de las áreas protegidas actuales para abordar la conectividad es muy variable según la región, cubriendo el 45% de las teselas de conservación propuestos en toda España, pero menos del 7% en el caso de la vegetación caducifolia.

6. CONCLUSIONES

El geoportal SABINA (www.geosabina.com) se presenta como una herramienta innovadora y esencial para guiar acciones de restauración y conservación en España frente a los desafíos del cambio climático, con aplicaciones que van desde la planificación forestal hasta la educación ambiental.

Esta herramienta cobra especial relevancia y actualidad adicional de cara a la próxima elaboración del Plan Nacional de Restauración que España debe elaborar en el marco del Reglamento de Restauración de la Naturaleza de la Unión Europea, recientemente aprobado en este año 2024.

Esta metodología ofrece una base científica robusta que integra modelos de distribución de especies, análisis de conectividad y proyecciones climáticas

Los resultados obtenidos refuerzan la necesidad de estrategias adaptativas y basadas en datos para enfrentar la pérdida de biodiversidad y la degradación del paisaje en un contexto de cambio climático.

La disponibilidad pública del geoportal asegura que los beneficios de esta herramienta sean ampliamente accesibles, contribuyendo a la transparencia en las fuentes de información y en la toma de decisiones consiguiente, y facilitando la colaboración entre investigadores, administraciones públicas y la sociedad en general para la protección y mejora del patrimonio natural y la biodiversidad de España.

7. FINANCIACIÓN

Este estudio fue desarrollado por el grupo de investigación SABINA (*Spatial ecology, Biodiversity conservation, and New modelling Approaches*) y financiado a través del proyecto Connect2restore (TED2021-129589B-I00) con el apoyo del Ministerio de Ciencia e Innovación (Agencia Estatal de Investigación) y la "Unión Europea NextGenerationEU/PRTR", así como con el proyecto NextDive (PID2021-124187NB-I00) financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (Agencia Estatal de Investigación) y "FEDER Una manera de hacer Europa".

BIBLIOGRAFÍA

- Adde, A., Rey, P., Brun, P., Külling, N., Fopp, F., Altermatt, F., Broennimann, O., Lehmann, A., Petitpierre, B., Zimmermann, N. E., Pellissier, L., & Guisan, A. (2023). N-SDM: a high-performance computing pipeline for Nested Species Distribution Modelling. *Ecography*, 1–11. <https://doi.org/10.1111/ecog.06540>
- Adriaensen, F., Chardon, J. P., De Blust, G., Swinnen, E., Villalba, S., Gulinck, H., & Matthysen, E. (2003). The application of "least-cost" modelling as a functional landscape model. *Landscape and Urban Planning*, 64(4), 233–247. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(02\)00242-6](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00242-6)
- Araújo, M. B., & New, M. (2006). Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in Ecology and Evolution*, 22(1), 42–47. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2006.09.010>
- Clark, J. S., Bell, D. M., Hersh, M. H., & Nichols, L. (2011). Climate change vulnerability of forest biodiversity: Climate and competition tracking of demographic rates. *Global Change Biology*, 17(5), 1834–1849. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02380.x>
- Correa Ayram, C. A., Mendoza, M. E., Etter, A., & Pérez Salicrup, D. R. (2015). Habitat connectivity in biodiversity conservation: A review of recent studies and applications. *Progress in Physical Geography*, 40(1), 1–32. <https://doi.org/10.1177/0309133315598713>
- European Commission. (2020). *COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS EU Biodiversity Strategy for 2030 Bringing nature back into our lives*. <https://ec.europa.eu/research/environment/index.cfm?pg=nbs>
- European Commission. (2021). *COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS: New EU Forest Strategy for 2030*.
- European Parliament, C. of the E. U. (2024). REGULATION (EU) 2024/1991 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 24 June 2024 on nature restoration and amending Regulation (EU) 2022/869 (Text with EEA relevance). *Official Journal of the European Union*. <http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1991/oj>

CONAMA 2024

HERRAMIENTA DE RESTAURACIÓN NACIONAL CONSIDERANDO CONECTIVIDAD Y VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO

- Felicísimo, Á. M., Muñoz, J., Villalba, C. J., & Mateo, R. G. (2011). *Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático de la biodiversidad española*.
- Felton, A., Lindbladh, M., Brunet, J., & Fritz, Ö. (2010). Replacing coniferous monocultures with mixed-species production stands: An assessment of the potential benefits for forest biodiversity in northern Europe. In *Forest Ecology and Management* (Vol. 260, Issue 6, pp. 939–947). <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.06.011>
- Godínez-Gómez, O. , & C. A. C. A. (2020). connectscape/Makurhini: Analyzing landscape connectivity. *Zenodo*.
- Goicolea, T., Adde, A., Broennimann, O., García-Viñas, J. I., Gastón, A., José Aroca-Fernández, M., Guisan, A., & G. Mateo, R. (2024). Spatially-nested hierarchical species distribution models to overcome niche truncation in national-scale studies. *Ecography*. <https://doi.org/10.1111/ecog.07328>
- Goicolea, T., Aroca-Fernández, M. J., García Viñas, J. I., Saura, S., González, S., Mateo, R. G., & Gastón, A. (2024). Identifying connectivity and climate-wise conservation networks: Insights from Spain. *In Press*.
- Goicolea, T., & Mateo-Sánchez, M. C. (2022). Static Vs Dynamic Connectivity: How Landscape Changes Affect Connectivity Predictions in the Iberian Peninsula. *Landscape Ecology*, 1–26. <https://doi.org/10.1007/s10980-022-01445-5>
- Guisan, A., Chevalier, M., Adde, A., Zarzo-Arias, A., Goicolea, T., Broennimann, O., Petitpierre, B., Scherrer, D., Rey, P.-L., Collart, F., Riva, F., Steen, B., & Mateo, R. G. (n.d.). Spatially-nested hierarchical species distribution models to avoid niche truncation. *Journal of Ecology*.
- Guisan, A., Thuiller, W., & Zimmermann, N. (2017). *Habitat Suitability and Distribution Models: with Applications in R*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139028271>
- Hilty, J., Worboys, G. L., Keeley, A., Woodley, S., Lausche, B., Locke, H., Carr, M., Pulsford, I., Pittock, J., White, J. W., Theobald, D. M., Levine, J., Reuling, M., Watson, J. E. M., Ament, R., & Tabor, G. M. (2020). *Guidelines for conserving connectivity through ecological networks and corridors Best Practice Protected Area Guidelines Series No. 30 Developing capacity for a protected planet*. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2020.PAG.30.en>
- IPBES. (2019). *The global assessment report on biodiversity and ecosystem services, Summary for policymakers*. <https://doi.org/https://doi.org/10.5281/zenodo.3553579>
- IPCC. (2023). *IPCC, 2023: Sections. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]*. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Jaureguiberry, P., Titeux, N., Wiemers, M., Bowler, D. E., Coscieme, L., Golden, A. S., Guerra, C. A., Jacob, U., Takahashi, Y., Settele, J., Díaz, S., Molnár, Z., & Purvis, A. (2022). The direct

CONAMA 2024

HERRAMIENTA DE RESTAURACIÓN NACIONAL CONSIDERANDO CONECTIVIDAD Y VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO

- drivers of recent global anthropogenic biodiversity loss. *Sci. Adv*, 8, 9982. <https://www.science.org>
- Jennings, M. K., Zeller, K. A., & Lewison, R. L. (2020). Supporting Adaptive Connectivity in Dynamic Landscapes. *Land*, 9(295), 1–19.
- Karger, D. N., Conrad, O., Böhrner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R. W., Zimmermann, N. E., Linder, H. P., & Kessler, M. (2017). Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data*, 4, 1–20. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122>
- Kool, J. T., Moilanen, A., & Treml, E. A. (2013). Population connectivity: Recent advances and new perspectives. *Landscape Ecology*, 28(2), 165–185. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9819-z>
- Liaw, A., & Wiener, M. (2002). Classification and Regression by randomForest. *RNews*, 2(3), 18–22.
- Mateo, R. G., Aroca-Fernández, M. J., Gastón, A., Gómez-Rubio, V., Saura, S., & García-Viñas, J. I. (2019). Looking for an optimal hierarchical approach for ecologically meaningful niche modelling. *Ecological Modelling*, 409(February), 108735. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2019.108735>
- Mateo, R. G., Morales-Barbero, J., Zarzo-Arias, A., Lima, H., Gómez-Rubio, V., & Goicolea, T. (2024). sabinasNSDM: An R package for spatially nested hierarchical species distribution modelling. *Methods in Ecology and Evolution*. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.14417>
- Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. (2021). *Estrategia Nacional de Infraestructura Verde y de la Conectividad y Restauración Ecológicas*.
- Minor, E. S., & Lookingbill, T. R. (2010). A Multiscale Network Analysis of Protected-Area Connectivity for Mammals in the United States. *Conservation Biology*, 24(6), 1549–1558. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2010.01558.x>
- Pacifici, M., Di Marco, M., & Watson, J. E. M. (2020). Protected areas are now the last strongholds for many imperiled mammal species. *Conservation Letters*, 13(6), 1–7. <https://doi.org/10.1111/conl.12748>
- Ribas, A., Olcina, J., & Sauri, D. (2020). More exposed but also more vulnerable? Climate change, high intensity precipitation events and flooding in Mediterranean Spain. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 29(3), 229–248. <https://doi.org/10.1108/DPM-05-2019-0149>
- Rousseau, J. S., & Betts, M. G. (2022). Factors influencing transferability in species distribution models. *Ecography*, 2022(7), e06060. <https://doi.org/10.1111/ecog.06060>
- Ruiz de la Torre J. (1990). *Mapa Forestal de España 1:200.000 Memoria General*.
- Santini, L., Saura, S., & Rondinini, C. (2016). Connectivity of the global network of protected areas. *Diversity and Distributions*, 22, 199–211. <https://doi.org/10.1111/ddi.12390>

CONAMA 2024

HERRAMIENTA DE RESTAURACIÓN NACIONAL CONSIDERANDO CONECTIVIDAD Y VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO

- Saura, S., Estreguil, C., Mouton, C., & Rodríguez-Freire, M. (2011). Network analysis to assess landscape connectivity trends: Application to European forests (1990-2000). *Ecological Indicators*, *11*(2), 407–416. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.06.011>
- Saura, S., & Pascual-Hortal, L. (2007). A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: Comparison with existing indices and application to a case study. *Landscape and Urban Planning*, *83*(2–3), 91–103. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.03.005>
- Saura, S., & Rubio, L. (2010). A common currency for the different ways in which patches and links can contribute to habitat availability and connectivity in the landscape. *Ecography*, *33*(3), 523–537. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2009.05760.x>
- Scherrer, D., Esperon-Rodriguez, M., Beaumont, L. J., Barradas, V. L., & Guisan, A. (2021). National assessments of species vulnerability to climate change strongly depend on selected data sources. *Diversity and Distributions*, *27*(8), 1367–1382. <https://doi.org/10.1111/ddi.13275>
- Secretariat of the Convention on Biological Diversity. (2024). *The Forest Factor The role of protection, restoration and sustainable management of forests for the implementation of the Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework*. www.cbd.int
- Spear, S. F., Balkenhol, N., Fortin, M. J., McRae, B. H., & Scribner, K. (2010). Use of resistance surfaces for landscape genetic studies: considerations for parameterization and analysis. *Molecular Ecology*, *19*, 3576–3591. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2010.04657.x>
- Taylor, P. D., Fahrig, L., Henein, K., Merriam, G., Taylor, P. D., & Fahrig, L. (1993). Connectivity is a vital element of landscape structure. *Oikos*, *68*(3), 571–573.
- Theodoridis, S., Patsiou, T. S., Randin, C., & Conti, E. (2018). Forecasting range shifts of a cold-adapted species under climate change: are genomic and ecological diversity within species crucial for future resilience? *Ecography*, *41*(8), 1357–1369. <https://doi.org/10.1111/ecog.03346>
- Thuiller, W., Brotons, L., Araújo, M. B., & Lavorel, S. (2004). Effects of restricting environmental range of data to project current and future species distributions. *Ecography*, *27*(2), 165–172. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2004.03673.x>
- Zeller, K. A., Lewison, R., Fletcher, R. J., Tulbure, M. G., & Jennings, M. K. (2020). Understanding the Importance of Dynamic Landscape Connectivity. *Land*, *9*(303), 1–15. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198838388.003.0005>
- Zeller, K. A., McGarigal, K., & Whiteley, A. R. (2012). Estimating landscape resistance to movement: A review. *Landscape Ecology*, *27*(6), 777–797. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9737-0>
- Zurell, D., Franklin, J., König, C., Bouchet, P. J., Dormann, C. F., Elith, J., Fandos, G., Feng, X., Guillera-Arroita, G., Guisan, A., Lahoz-Monfort, J. J., Leitão, P. J., Park, D. S., Peterson, A. T., Rapacciuolo, G., Schmatz, D. R., Schröder, B., Serra-Diaz, J. M., Thuiller, W., ... Merow, C.

CONAMA 2024

HERRAMIENTA DE RESTAURACIÓN NACIONAL CONSIDERANDO CONECTIVIDAD Y VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO

(2020). A standard protocol for reporting species distribution models. *Ecography*, 43(9), 1261–1277. <https://doi.org/10.1111/ecog.04960>