

UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Proyecto investigador

Oliver Gutiérrez Hernández

Concurso de Acceso a Cuerpos Docentes Universitarios
Área de Análisis Geográfico Regional
Plaza 145TUN25

A la memoria de mi hermano **Mingo**

27-04-1979 † 20-12-2025



Contexto del proyecto

El presente proyecto se elabora en el marco del concurso de acceso a plazas de Cuerpos Docentes Universitarios convocado por la Universidad de Málaga mediante Resolución de 19 de septiembre de 2025, publicada en el Boletín Oficial del Estado el 29 de septiembre de 2025 (Universidad de Málaga, 2025; BOE-A-2025-19255).

Esta convocatoria se integra dentro de la Oferta de Empleo Público de Personal Docente e Investigador correspondiente al año 2025 y se rige por la Ley Orgánica 2/2023, de 22 de marzo, del Sistema Universitario (Jefatura del Estado, 2023a); el Real Decreto 678/2023, de 18 de julio, por el que se regula la acreditación estatal para el acceso a los cuerpos docentes universitarios y el régimen de los concursos de acceso a plazas de dichos cuerpo (Jefatura del Estado, 2023b); así como por los reglamentos de la Universidad de Málaga relativos a la constitución de las Comisiones de Selección y al desarrollo de los concursos de acceso (Universidad de Málaga (2025): BOJA número 97 de 21/05/2024).

En este contexto se convoca la plaza 145TUN25, perteneciente al Cuerpo de Profesor/a Titular de Universidad, adscrita al Área de Conocimiento de Análisis Geográfico Regional y al Departamento de Geografía. La tabla 1 (véase la página siguiente) muestra las especificaciones de la plaza.

De acuerdo con lo establecido en el apartado 9.2 de la Resolución de 19 de septiembre de 2025, (Universidad de Málaga, 2025; BOE-A-2025-19255), en el acto de presentación ante la Comisión de Selección las personas aspirantes al cuerpo de Profesores/as Titulares de Universidad deberán aportar, en formato electrónico, la siguiente documentación:

- Historial académico, docente e investigador y, en su caso, asistencial sanitario, en el que se detallarán los méritos hasta la fecha de finalización del plazo de presentación de solicitudes, según el modelo normalizado CVN ANECA (FECYT).
- Publicaciones y documentos acreditativos de los méritos alegados en el historial académico, docente e investigador. El candidato o candidata deberá presentar una declaración jurada en la que asegure que la documentación responde fielmente al original, en el caso de documentos no electrónicos, sin perjuicio de que puedan ser requeridos al interesado o interesada los oportunos documentos originales que acrediten la citada declaración.
- Proyecto docente referido a una asignatura obligatoria, adscrita al área de conocimiento de la plaza objeto de concurso e incluida en el correspondiente plan de estudios de una titulación oficial de Grado o Máster de la Universidad de Málaga, con validez en todo el territorio nacional y que esté vigente en la fecha de publicación de la convocatoria de la plaza en el «Boletín Oficial del Estado».
- Proyecto de investigación que el candidato o la candidata pretenda desarrollar, conforme a la actividad docente e investigadora que conste en la convocatoria de la plaza.
- Un resumen del tema elegido libremente por el candidato o la candidata, entre los presentados en el proyecto docente, para su exposición oral. El resumen no podrá exceder las 25 páginas.

Tabla 1. Especificaciones de la plaza objeto de la memoria

Código de la plaza	145TUN25.
Área de conocimiento	Análisis Geográfico Regional.
Departamento	Geografía.
Perfil docente	Docencia en la asignatura de *Geografía descriptiva del mundo: el marco geográfico*.
Perfil investigador	Investigación en *Conexiones biogeográficas, crisis ambientales y gestión adaptativa en los abetales endémicos de la Reserva de la Biosfera Intercontinental del Mediterráneo*.

Fuente: elaboración propia. Datos: Universidad de Málaga (2025; BOE-A-2025-19255).

Guía del documento

El presente documento constituye el **Proyecto Investigador** objeto de la plaza 145TUN25 y se enmarca en lo establecido en la normativa de la convocatoria, que requiere la presentación de un «Proyecto de investigación que el candidato o la candidata pretenda desarrollar, conforme a la actividad docente e investigadora que conste en la convocatoria de la plaza».

Atendiendo a que la convocatoria contempla la valoración conjunta de la adecuación del proyecto al perfil investigador de la plaza y del historial académico, docente e investigador del candidato, el proyecto se ha diseñado teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Calidad y adecuación del proyecto de investigación, considerando la definición de objetivos científicos, el desarrollo metodológico, la adecuación al perfil investigador de la plaza y la continuidad con la trayectoria investigadora previa, con proyección de desarrollo futuro.
- Capacidad de innovación del conocimiento del proyecto de investigación, mediante la aplicación de nuevos enfoques en el análisis geográfico multiescalar y un desarrollo metodológico riguroso, orientados al avance del conocimiento científico.
- Impacto y proyección del proyecto, incluyendo su aplicación en el área de estudio, su potencial de transferencia, su vocación formativa orientada a la capacitación de personal técnico e investigador y su capacidad para captar financiación competitiva.

La organización de la memoria del proyecto de investigación se ha estructurado tomando como referencia, de forma adaptada y ampliada, las últimas convocatorias de «Proyectos de Generación de Conocimiento" del Plan Estatal de Investigación Científica, Técnica y de Innovación 2024-2027. No obstante, dicha estructura se ha concebido con un carácter flexible y modular, de manera que la propuesta pueda ser adaptada, mediante modificaciones específicas, a diferentes convocatorias competitivas de naturaleza y alcance similares.

Con el fin de facilitar una lectura clara y centrada en los elementos sustantivos del trabajo, la memoria presenta, en su núcleo, la información esencial sobre qué se propone desarrollar y cómo se plantea llevarlo a cabo, explicitando su alineación con el perfil investigador de la plaza.

Proyecto:

Conexiones biogeográficas, crisis ambientales y gestión adaptativa en los abetales endémicos de la Reserva de la Biosfera Intercontinental del Mediterráneo



Estrecho de Gibraltar y Arco de Gibraltar (STS-59, Endeavour, abril de 1994; imagen STS059-238-074). Fotografía oblicua obtenida durante la misión STS-59 del Transbordador Espacial Endeavour (NASA). El Arco de Gibraltar está constituido por las cordilleras Béticas, en el sur de Europa, y por el Rif, en el norte de África.

Índice general

1. Acerca del proyecto 8
1.1. Título 8
1.2. Resumen 9
2. Justificación del proyecto 10
2.1. Marco geográfico y biogeográfico 10
2.1.1. El Arco de Gibraltar 10
2.1.2. El límite suroccidental de los abetos circunmediterráneos 12
2.2. Problemática ambiental del área de estudio 14
2.2.1. Las Reservas de la Biosfera como marco de conservación ambiental 14
2.2.2. La Reserva de la Biosfera Intercontinental del Mediterráneo 15
2.2.3. El refugio de los abetales bético-rifeños: *Abies pinsapo* y *Abies marocana* 16
2.3. Necesidades de investigación sobre los abetales de la Reserva 19
2.3.1. Necesidad de investigación básica sobre los abetales bético-rifeños 19
2.3.2. Necesidad de investigación aplicada sobre su problemática ambiental 20
3. Objetivos 23
3.1. Objetivo general 23
3.2. Objetivos específicos 23
3.3. Articulación y naturaleza de los objetivos del proyecto 23
4. Marco metodológico 25
4.1. Tecnologías de la información geográfica 25
4.2. Modelos predictivos en biogeografía 26
4.3. Monitorización ambiental con sensores remotos 31
4.4. Pruebas de tendencia estacional e interanual 33
4.5. Control del error estadístico y espacial 35
4.6. Evaluación multicriterio de escenarios 37
5. Organización del trabajo 40
5.1. Equipo 40
5.2. Actividades 43
5.2.1. Diseño de la arquitectura del SIG 43
5.2.2. Captura, integración y homogeneización de datos georreferenciados 43
5.2.3. Trabajos de campo 44

5.2.4. Preparación y preprocesado de distribuciones y registros de presencia 44
5.2.5. Modelización y análisis de conexiones biogeográficas 45
5.2.6. Construcción de series temporales y productos espectrales multiescalares 46
5.2.7. Análisis de tendencias estacionales e interanuales y detección de rupturas 46
5.2.8. Análisis del paisaje forestal y conectividad ecológica 47
5.2.9. Evaluación multicriterio de escenarios 47
5.2.10. Transferencia, difusión y productos operativos 48
5.3. Cronograma 49
5.4. Infraestructura 51
5.5. Contratación de servicios externos 52
5.6. Compra de material y equipamiento 54
5.6.1. Equipamiento imprescindible 54
5.6.2. Material complementario de apoyo científico-técnico 55
5.7. Plan de contingencia: identificación de riesgos y medidas de mitigación 56
6. Impacto esperado 60
6.1. Publicaciones científicas 60
6.2. Plan de difusión y divulgación 63
6.3. Plan de formación 64
6.4. Transferencia 65
7. Financiación 66
7.1. Necesidades presupuestarias 66
7.2. Financiación pública 67
7.3. Financiación privada 68
8. Ética 69
9. Continuidad 69
Referencias 71

Índice de figuras

Figura 1. Arco de Gibraltar 10
Figura 2. Estrecho de Gibraltar 11
Figura 3. Distribución global del género *Abies* 12
Figura 4. Distribución de los abetos circummediterráneos 13
Figura 5. Zonificación de las Reservas de la Biosfera 14
Figura 6. Área de estudio 15
Figura 7. Paisajes forestales de los abetales bético-rifeños 16
Figura 8. Distribución y cobertura arbórea de *Abies pinsapo* 17
Figura 9. Distribución y cobertura arbórea de *Abies marocana* 17
Figura 10. Frecuencia de los registros de presencia de pinsapo según exposición 18
Figura 11. Problemas ambientales de los abetales bético-rifeños 21
Figura 12. *Science* se hizo eco de la degradación ambiental en Talassemtane 22
Figura 13. Articulación operativa de los objetivos específicos del proyecto 24
Figura 14. Tecnologías de la Información Geográfica 25
Figura 15. Diagrama de BAM 27
Figura 16. Modelos predictivos en biogeografía 29
Figura 17. Escenarios actual y futuro del hábitat de *Abies pinsapo* 30
Figura 18. Extracción de una serie temporal a partir de imágenes multitemporales 31
Figura 19. Curva fenológica anual basada en el NDVI 32
Figura 20. Tendencias en la estacionalidad debidas al calentamiento global 34
Figura 21. Pruebas de tendencia e inferencia selectiva 35
Figura 22. Análisis de Tendencias Verdaderamente Significativas (TST) 36
Figura 23. Evaluación multicriterio en un SIG 37

Índice de tablas

Tabla 1. Especificaciones de la plaza objeto de la memoria 2
Tabla 2. Propuesta de equipos de investigación y trabajo 40
Tabla 3. Cronograma de actividades del proyecto 49
Tabla 4. Resumen del plan de contingencia 56

1. Acerca del proyecto

1.1. Título

El título del proyecto es «Conexiones biogeográficas, crisis ambientales y gestión adaptativa en los abetales endémicos de la Reserva de la Biosfera Intercontinental del Mediterráneo», en inglés «Biogeographical Connections, Environmental Crises and Adaptive Management in the Endemic Fir Forests of the Intercontinental Mediterranean Biosphere Reserve», y sintetiza el objeto de estudio, el enfoque científico y el marco territorial de la investigación.

Se ha escogido como denominación abreviada del proyecto «InterAbies», un nombre construido a partir de la combinación de Inter y *Abies*, que funciona de manera equivalente en español, inglés y latín, y que destaca el carácter intercontinental único de los abetales endémicos formados por *Abies pinsapo* Boiss. y *Abies marocana* Trab., el único grupo dentro del género *Abies* con distribución natural intercontinental (Europa y África) situado en la misma reserva de la biosfera.

Las distintas expresiones que componen el título del proyecto articulan los principales ejes de la investigación.

1. La referencia a las «conexiones biogeográficas» alude al análisis de los vínculos geográficos, históricos (en el sentido de la historia natural), ecológicos y ambientales entre las poblaciones béticas y rifeñas, así como a su papel como relictos, refugios climáticos y nodos de conectividad biogeográfica en el Mediterráneo occidental.
2. La mención «crisis ambientales» subraya el contexto de elevada vulnerabilidad de ambos taxones, catalogados como En Peligro de Extinción por la UICN, frente al cambio climático, la aridificación estival, la intensificación de los extremos térmicos, los incendios forestales, la fragmentación del hábitat, las presiones antrópicas y la incidencia creciente de patógenos.
3. La expresión «gestión adaptativa» pone de manifiesto la orientación aplicada del proyecto, dirigida a generar conocimiento científico útil para apoyar estrategias de conservación, restauración ecológica, planificación territorial y toma de decisiones en escenarios caracterizados por una creciente incertidumbre ambiental.
4. La mención a los «abetales endémicos» destaca el carácter singular y altamente restringido de los sistemas forestales objeto de estudio, sustentados por dos especies relictas de distribución extremadamente limitada y de elevado valor biogeográfico.
5. Finalmente, la referencia explícita a la «Reserva de la Biosfera Intercontinental del Mediterráneo» define el marco geográfico y territorial del proyecto, un espacio reconocido por la UNESCO que integra conservación, desarrollo sostenible e investigación y constituye un laboratorio natural privilegiado para el análisis comparado y la cooperación científica transfronteriza.

En conjunto, el título sintetiza un proyecto orientado al estudio integrado de la biogeografía, la dinámica ambiental y la conservación aplicada de uno de los sistemas forestales más singulares y amenazados del Mediterráneo occidental.

1.2. Resumen

El proyecto InterAbies se orienta al análisis integrado de las conexiones biogeográficas, la dinámica ambiental y la respuesta frente a las crisis ambientales de los abetales endémicos de la Reserva de la Biosfera Intercontinental del Mediterráneo (España-Marruecos), con especial atención a *Abies pinsapo* y *Abies marocana*, dos especies relictas catalogadas *En Peligro* de Extinción por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN).

Estos sistemas forestales, ubicados en el Arco de Gibraltar (o Arco Bético-Rifeño), representan el límite suroccidental de los abetos circunmediterráneos y constituyen refugios climáticos de gran singularidad biogeográfica. Su distribución extremadamente restringida y fragmentada, unida al incremento de la aridez estival, a la intensificación de los extremos térmicos, a la mayor recurrencia de incendios forestales, a las presiones antrópicas y a la incidencia creciente de patógenos, sitúa a ambos taxones en una posición de elevada vulnerabilidad frente al cambio ambiental.

A pesar de su alto valor ecológico y paisajístico, persisten lagunas importantes de conocimiento en la caracterización comparada de su nicho ecológico, en la comprensión integrada de su dinámica espaciotemporal y en la evaluación de su capacidad de respuesta ante escenarios futuros, lo que limita el diseño de estrategias de gestión adaptativa basadas en evidencia científica.

El proyecto propone un enfoque metodológico integrado basado en tecnologías de la información geográfica, en la modelización de la distribución de especies, en la teledetección ambiental multitemporal, en el análisis robusto de tendencias espaciotemporales con control explícito del error estadístico y en la evaluación multicriterio de escenarios. Este enfoque permitirá integrar información topográfica, climática, espectral, biogeográfica, fenológica, paisajística y socioecológica en un marco espacialmente explícito, reproducible y comparable.

Entre los objetivos específicos destacan: la construcción de un sistema de información geográfica (SIG) integrado a escala de la Reserva; la modelización comparada del nicho ecológico de ambas especies; la monitorización de la dinámica estacional e interanual mediante series temporales de índices de vegetación; la detección de tendencias, rupturas y señales ambientales robustas con control de la tasa de falsos descubrimientos; el análisis de la estructura del paisaje y de la conectividad ecológica; y la generación de escenarios multicriterio orientados a la planificación territorial y la conservación.

El proyecto se estructura en un plan de trabajo modular y progresivo, que integra trabajo de campo, análisis espacial, modelización y transferencia, con un fuerte énfasis en la reproducibilidad científica, la formación de personal investigador y técnico, y la generación de productos operativos para gestores y administraciones.

En conjunto, InterAbies aspira a proporcionar un marco científico-técnico riguroso y aplicable para la conservación y la gestión adaptativa del único sistema intercontinental de abetales del mundo situado en una misma reserva de la Biosfera, contribuyendo al avance del conocimiento en biogeografía, ecología de la conservación y análisis territorial, y reforzando la cooperación científica y técnica en el ámbito de la Reserva de la Biosfera Intercontinental del Mediterráneo.

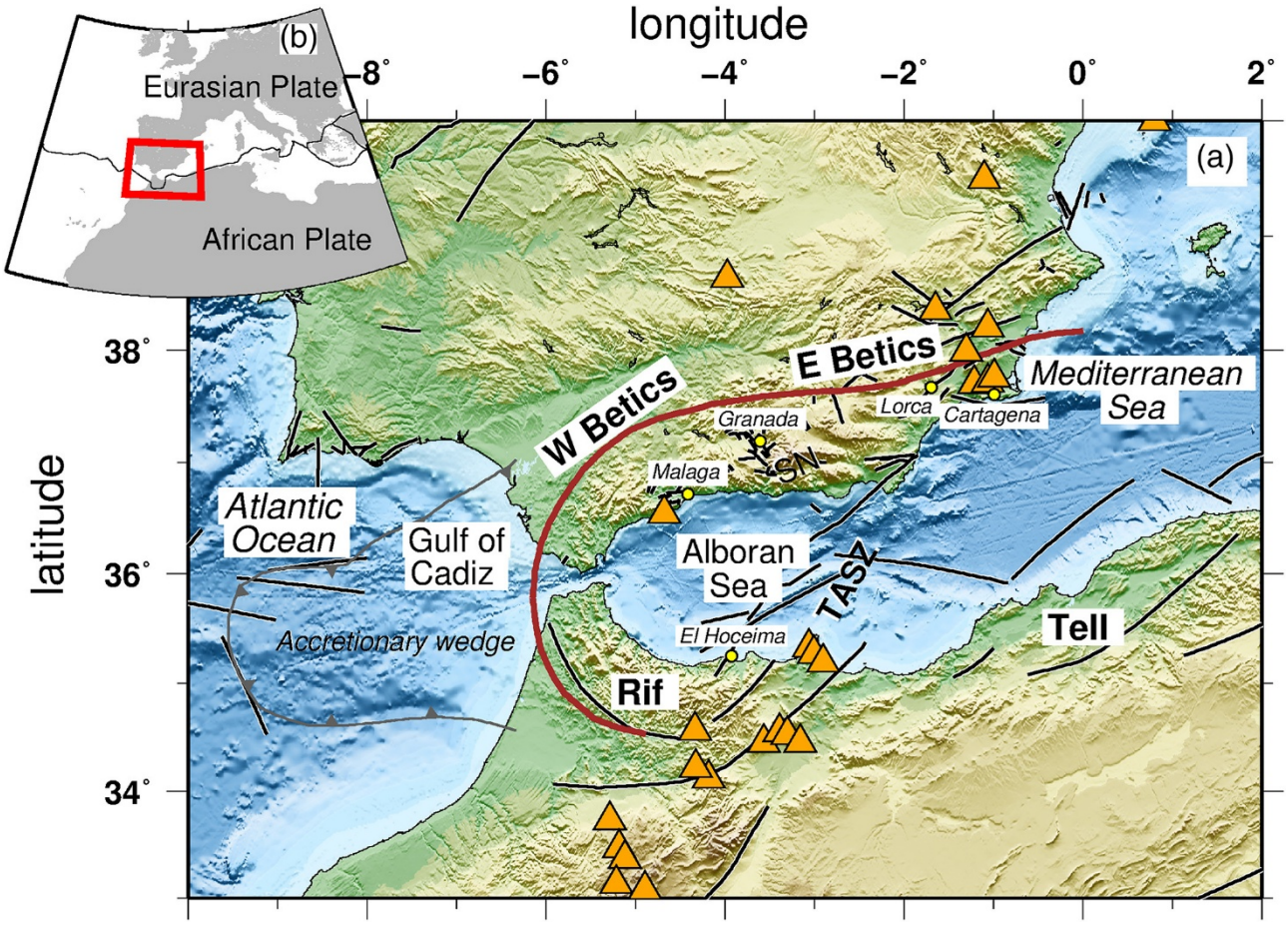
2. Justificación del proyecto

2.1. Marco geográfico y biogeográfico

2.1.1. El Arco de Gibraltar

El Arco de Gibraltar es una estructura geológica intercontinental situada en la zona de contacto entre Europa y África (Figura 1), y constituye el extremo occidental del orógeno alpino en el Mediterráneo occidental (Civiero et al., 2020). Está formado por las cordilleras Béticas, en el sur de la península ibérica, y por las montañas del Rif, en el norte de Marruecos, y presenta una marcada forma arqueada. Su configuración actual es el resultado de una historia geológica desarrollada durante la era terciaria, particularmente en el Neógeno y, en especial, durante el Mioceno, desde hace aproximadamente 30 millones de años, relacionada con el acercamiento e interacción entre las placas africana y europea y con los procesos tectónicos ligados a la región de Alborán (Andrieux et al., 1971; Faccenna et al., 2004; Lonergan & White, 1997; Serpelloni et al., 2007).

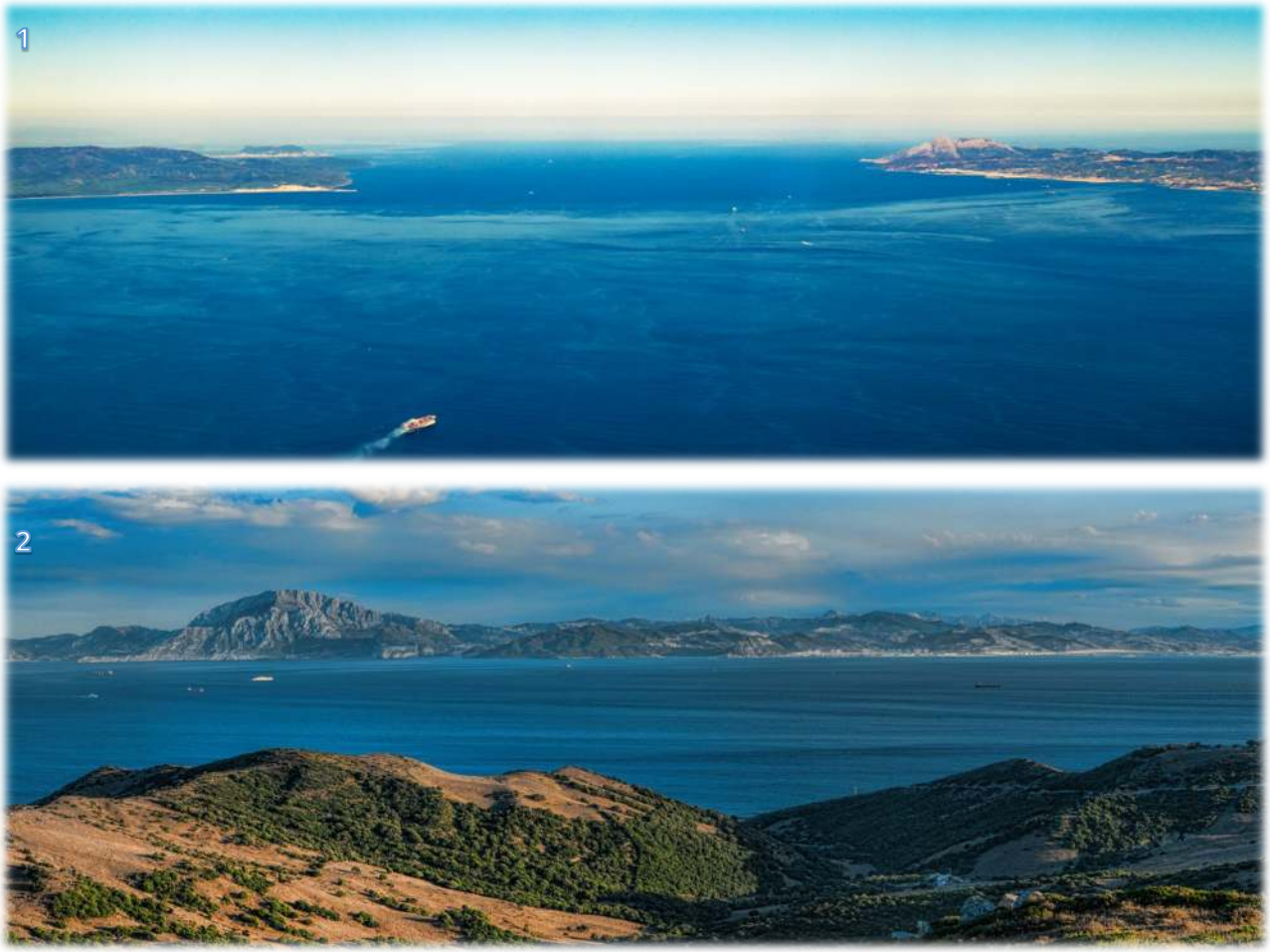
Figura 1. Arco de Gibraltar



Nota: La figura muestra (a) la topografía del Arco de Gibraltar, las principales fallas, el trazado del arco y la cuña acrecional, es decir, el conjunto de sedimentos comprimidos y apilados en el margen del Golfo de Cádiz, junto con los campos volcánicos cenozoicos y los principales rasgos geomorfológicos de la región; y (b) la localización del área de estudio dentro del límite de placas entre Eurasia y África. Fuente: Civiero et al. (2020).

En la inflexión del arco, el estrecho de Gibraltar constituye el paso marítimo que conecta el océano Atlántico con el mar Mediterráneo y separa el extremo sur de Europa del norte de África (Figura 2), habiendo funcionado durante la mayor parte de su historia geológica como un corredor oceanográfico (Candela, 1991; Loget & Van Den Driessche, 2006). Se localiza en torno a las coordenadas centrales 35° 55’ N y 5° 30’ O, y presenta una longitud aproximada de 60 km, una anchura mínima ligeramente superior a 14 km y una profundidad media cercana a 300 m, alcanzando en algunos sectores valores próximos a 900 m (Bryden et al., 1994).

Figura 2. Estrecho de Gibraltar



Nota: fotografía superior (1), vista panorámica del Estrecho de Gibraltar, que muestra la conexión marítima entre Europa y África; fotografía inferior (2), vista del Estrecho de Gibraltar desde la costa española, con el Jbel Musa (Marruecos), coronando las primeras estribaciones del Rif, al fondo. Fuente: Unesco. Man & the Biosphere Programme (1) & Diego de Crespos (2).

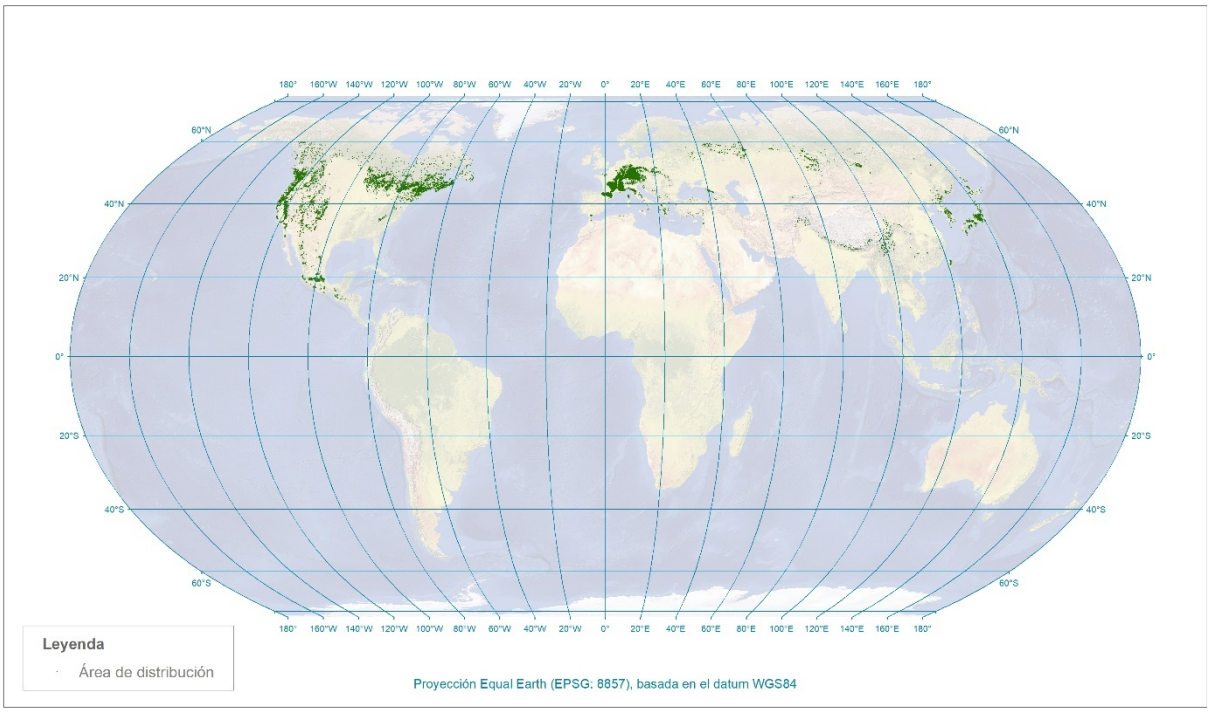
Debido a la reducida distancia entre ambos continentes y al hecho de que, en determinados momentos de su evolución geológica, llegó a existir una conexión terrestre entre Europa y África, este ámbito ha funcionado en ocasiones como puente, favoreciendo el contacto y la interacción entre ambas orillas, y en otras como barrera, dificultando los intercambios entre ambos conjuntos continentales (Garcia-Castellanos et al., 2009). Todo ello ha otorgado a este ámbito una singularidad biogeográfica excepcional, al conjugar conectividad, alta biodiversidad y funciones de refugio.

2.1.2. El límite suroccidental de los abetos circunmediterráneos

El género *Abies* comprende más de 50 especies distribuidas exclusivamente en el hemisferio norte, con un patrón biogeográfico marcadamente disyunto y asociado a regiones montañosas de clima templado y frío. El principal centro de diversidad del género se localiza actualmente en el este del Himalaya, donde se concentra el mayor número de especies, acompañado de centros secundarios de diversificación en Japón, Norteamérica y el ámbito mediterráneo (Xiang et al., 2018).

La distribución del género *Abies* (Figura 3) está estrechamente vinculada a ambientes relativamente frescos y húmedos, caracterizados por precipitaciones generalmente estacionales y temperaturas relativamente bajas. Su diversificación evolutiva se asocia a procesos orogénicos que, al generar nuevos gradientes altitudinales y climáticos —especialmente en regiones previamente áridas o semiáridas—, promovieron la creación de una amplia variedad de nichos ecológicos. Esta heterogeneidad ambiental favoreció tanto el aislamiento geográfico de las poblaciones como episodios de radiación adaptativa (Semerikova et al., 2018; Xiang et al., 2025).

Figura 3. Distribución global del género *Abies*



Fuente: elaboración propia. Adaptado de Xiang et al. (2025).

Morfológicamente, las especies de *Abies* son árboles perennifolios de tronco recto y copa cónica, con una ramificación muy regular, hojas aciculares planas y conos femeninos erectos, rasgos que favorecen la intercepción de la luz, la resistencia a la nieve y el aprovechamiento de ambientes fríos y húmedos (Den Ouden, 1982). Estas características se traducen en la ocupación preferente de los pisos montanos y subalpinos, donde *Abies* forma bosques densos o mixtos adaptados a las condiciones climáticas de montaña.

Un conjunto particular de especies del género *Abies* corresponde a los denominados abetos circunmediterráneos (Figura 4) (Caudullo & Tinner, 2016). Como ocurre en la mayor parte de los abetos del grupo, su persistencia está estrechamente ligada a condiciones microtopográficas y ambientales favorables, caracterizadas por mayor humedad, temperaturas más bajas y menor estrés estival, que generan ambientes con rasgos más propios de latitudes septentrionales dentro de un contexto claramente mediterráneo (Aussenac, 2002). En el extremo suroeste de su área de distribución, se encuentran los abetos bético-rifeños, *Abies pinsapo* y *Abies marocana*.

Figura 4. Distribución de los abetos circummediterráneos



Fuente: elaboración propia.

La singularidad biogeográfica del conjunto de abetos circummediterráneos, tiene su origen en una secuencia compleja de transformaciones geológicas y climáticas. De acuerdo con Linares (2011), entre los factores determinantes se encuentran: la elevación de las cordilleras litorales, asociada a la colisión entre las placas euroasiática y africana, que configura las grandes unidades del relieve actual y contribuyó a consolidar un régimen climático dominado por altas presiones estivales, responsable del marcado déficit hídrico durante el verano (Suc, 1984); el proceso de aridificación progresiva que afectó a la cuenca mediterránea desde el Mioceno medio y, de forma especialmente intensa, durante el Plioceno (Kovar-Eder et al., 2006); y, posteriormente, la sucesión de fases glaciares e interglaciares a lo largo del Cuaternario, que habría favorecido la contracción de las áreas de distribución del género *Abies* —con especies como el pinsapo, de crecimiento lento— y el aislamiento de sus poblaciones en refugios climáticos (Willis & Niklas, 2004).

2.2. Problemática ambiental del área de estudio

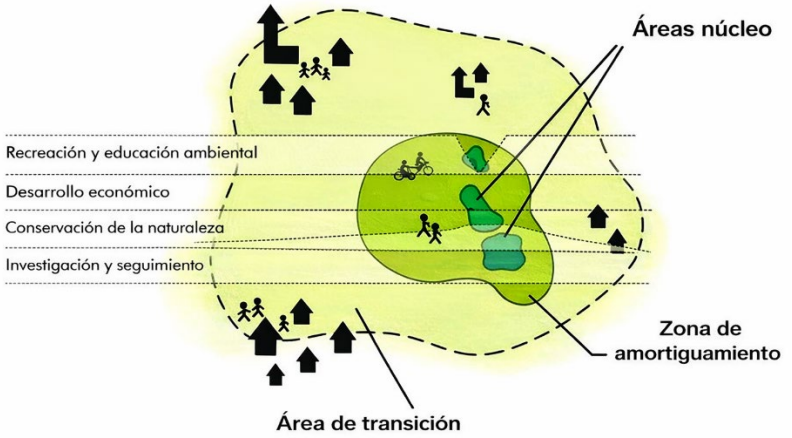
2.2.1. Las Reservas de la Biosfera como marco de conservación ambiental

Una reserva de la biosfera es un territorio reconocido internacionalmente por la UNESCO cuyo objetivo es conciliar la conservación de la biodiversidad con el desarrollo humano, promoviendo una relación equilibrada entre las personas y la naturaleza (Bridgewater, 2002).

Estas reservas son propuestas por los gobiernos nacionales y permanecen bajo la jurisdicción soberana de los Estados en los que se localizan (UNESCO, 2024). Su reconocimiento internacional se otorga en el marco del Programa sobre el Hombre y la Biosfera (MAB), siendo la Dirección General de la UNESCO quien formaliza la designación tras la decisión del Consejo Internacional de Coordinación del MAB (MAB-ICC) (UNESCO, 1996, 2017).

Las reservas de la biosfera se conciben como espacios de gestión participativa, en los que las comunidades locales y los distintos agentes sociales e institucionales intervienen activamente en los procesos de planificación y toma de decisiones (Van Cuong et al., 2017). Su funcionamiento se articula en torno a tres ejes: la conservación del patrimonio natural y cultural, el impulso de un desarrollo sostenible adaptado al territorio y la generación de conocimiento mediante la investigación, el seguimiento ecológico y la educación ambiental. Estas funciones se concretan mediante una estructura zonal formada por tres áreas complementarias (UNESCO, 2022; Figura 5). La zona núcleo, o central, constituye el espacio de máxima protección, orientado a la preservación de los paisajes, los ecosistemas, las especies y la diversidad genética. En torno a ella se dispone la zona de amortiguamiento, donde se permiten usos compatibles con la conservación, y que cumple un papel clave en el apoyo a la investigación, la vigilancia, la formación y la educación ambiental. Finalmente, la zona de transición corresponde al ámbito en el que se desarrollan actividades humanas y económicas de carácter sostenible, promovidas por las comunidades locales e integradas con la protección ecológica y cultural del territorio (Sandström et al., 2025).

Figura 5. Zonificación de las Reservas de la Biosfera



Fuente: adaptado de Mehring & Stoll-Kleemann (2010).

2.2.2. La Reserva de la Biosfera Intercontinental del Mediterráneo

En 2006 se creó la primera reserva de la biosfera de carácter intercontinental, con la designación de la Reserva de la Biosfera Intercontinental del Mediterráneo (Maldonado-Briegas et al., 2025; UNESCO, 2006). Esta reserva se extiende entre el sur de Europa (España) y el norte de África (Marruecos), configurando un arco territorial abierto al Mediterráneo, con su punto de inflexión en el estrecho de Gibraltar (Figura 6). El espacio protegido abarca 414.288 hectáreas terrestres y 9.247 hectáreas marinas, proyectando la continuidad entre los sistemas continentales y costeros de ambos lados del estrecho.

Figura 6. Área de estudio



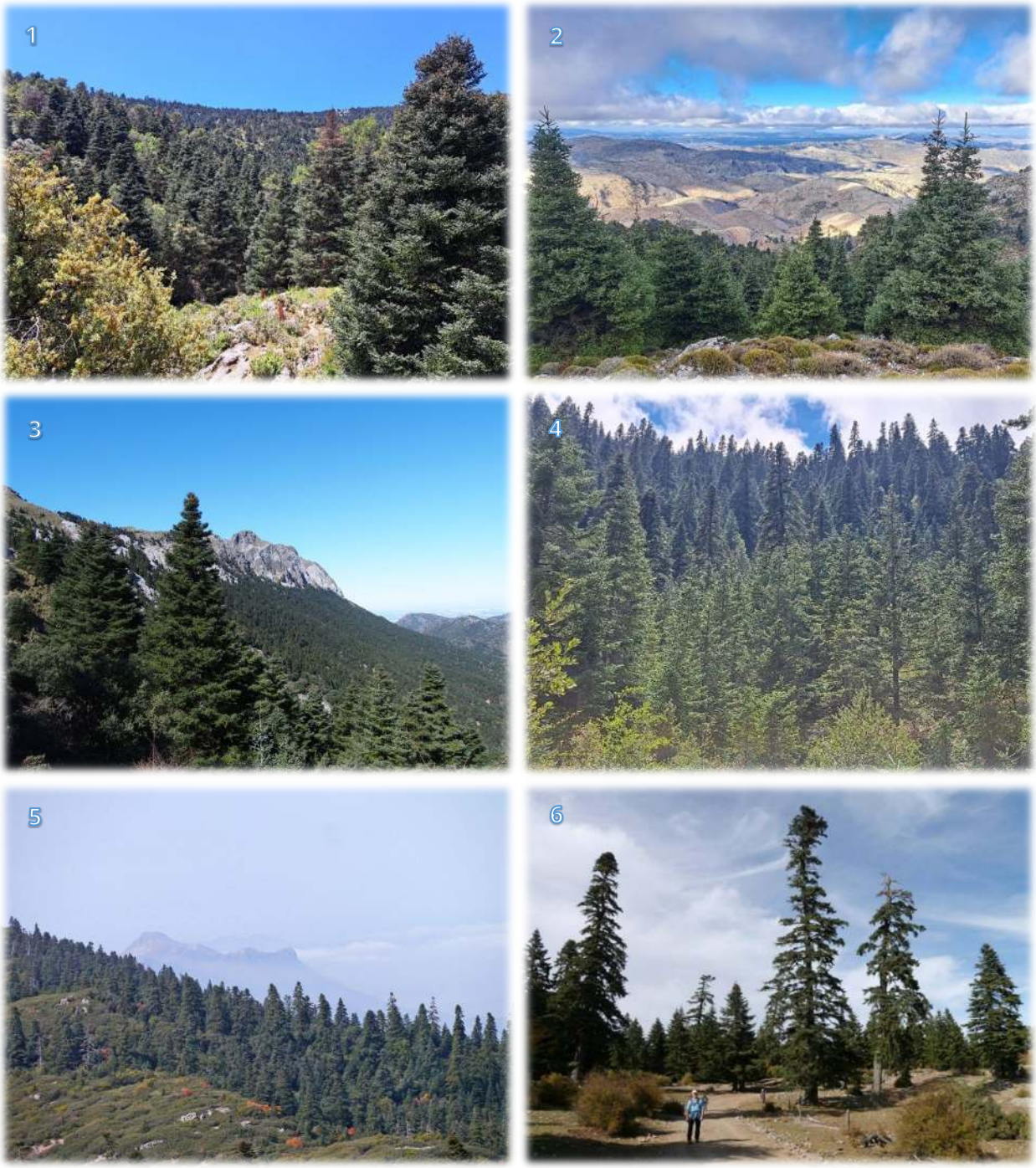
Fuente: elaboración propia.

La diversidad de esta reserva se articula en torno a varios ejes fundamentales, como los sistemas montañosos, la disponibilidad de agua, los abetales y un rico patrimonio cultural, así como en la complementariedad ecológica, paisajística y territorial entre sus vertientes norte y sur (Consejería de Medio Ambiente, 2012). El papel estructurante de la montaña y de los sistemas forestales, presentes a ambos lados del Estrecho, resulta clave para comprender la singularidad ecológica del territorio, reconocido como un *hotspot* de biodiversidad (Rodríguez-Sánchez et al., 2008), y fundamenta su designación como la primera reserva de la biosfera intercontinental.

2.2.3. El refugio de los abetales bético-rifeños: *Abies pinsapo* y *Abies marocana*

Los abetales bético-rifeños ocupan conjuntamente algo menos de 7.000 hectáreas (Gutiérrez-Hernández, 2025) y constituyen un conjunto forestal de excepcional valor biogeográfico y paisajístico (Figura 7), sustentado por dos especies endémicas estrechamente emparentadas (Balao et al., 2020; Ben-Said, 2022; Dering et al., 2014; Terrab et al., 2007): el abeto español o pinsapo (*Abies pinsapo*) y el abeto marroquí (*Abies marocana*).

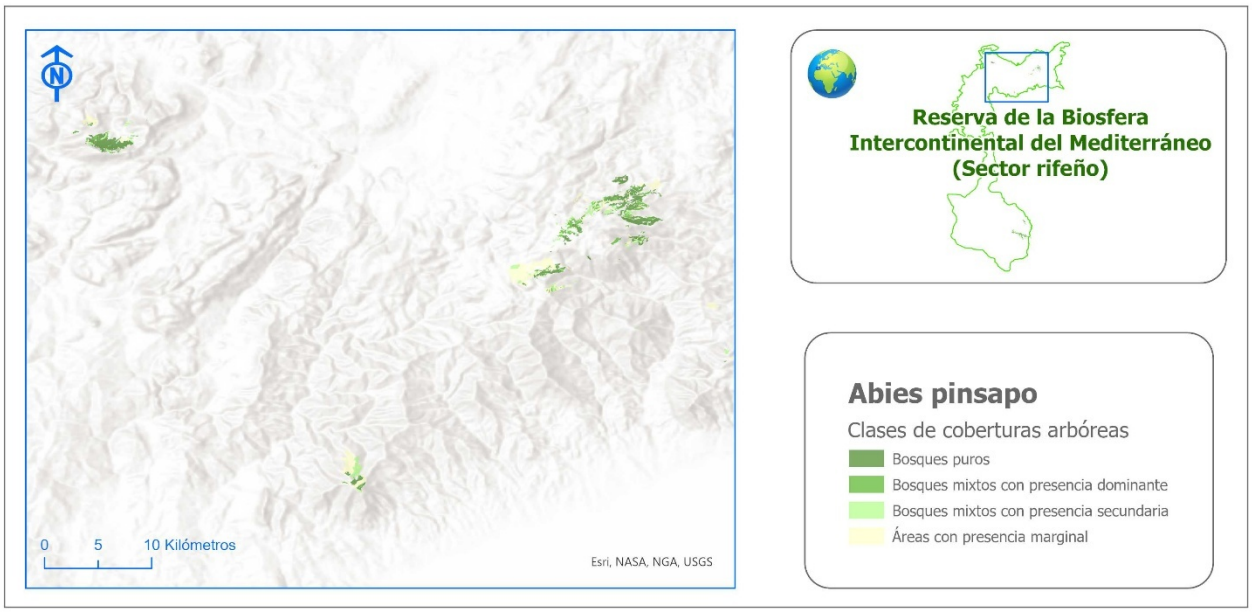
Figura 7. Paisajes forestales de los abetales bético-rifeños



Nota: abetal de Yunquera (1), Ronda (2) y Grazalema (3) ; abetal de Talassemtame (4) y Tazaot (5 y 6).
Fuente: Rafael Flores Domínguez. RF Natura.

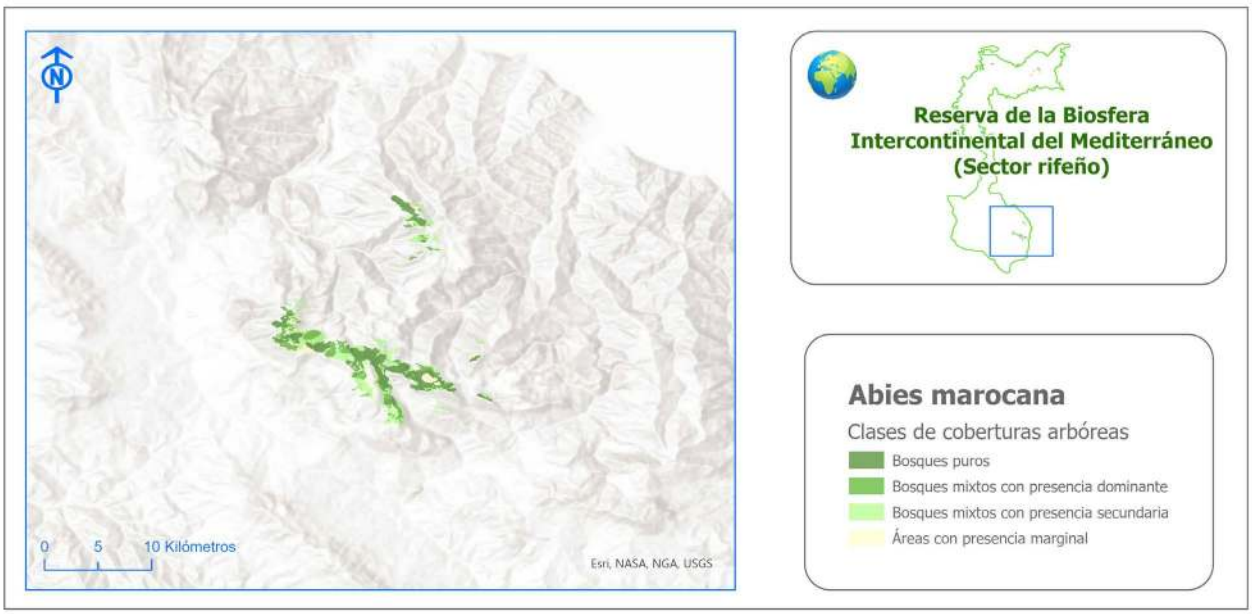
De acuerdo con la caracterización propuesta en Gutiérrez-Hernández (2025), *Abies pinsapo* Boiss. (Boissier, 1837) ocupa 2.690 hectáreas (Figura 8), que incluyen 918,99 de masas puras, 407,02 de masas mixtas dominadas por A. pinsapo, 414,88 de masas mixtas con *A. pinsapo* como especie secundaria y 949,81 de áreas con presencia dispersa de *A. pinsapo*. Por su parte, *Abies marocana* Trabs. (Trabut, 1906, 1928) ocupa 4.206 hectáreas (Figura 9), que incluyen 1.648,25 de masas puras, 802,40 de masas mixtas dominadas por *A. marocana*, 1.385,26 de masas mixtas con *A. marocana* como especie secundaria y 370,96 de áreas con presencia dispersa de *A. marocana*.

Figura 8. Distribución y cobertura arbórea de *Abies pinsapo*



Fuente: elaboración propia. Basado en O Gutiérrez-Hernández & García (2025).

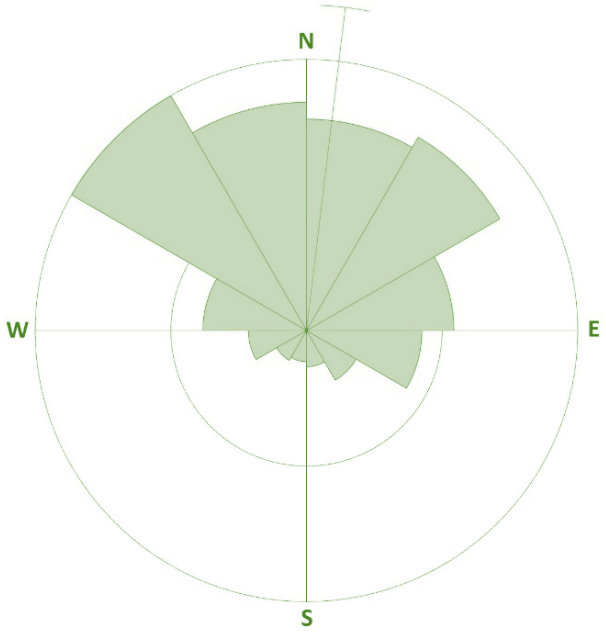
Figura 9. Distribución y cobertura arbórea de *Abies marocana*



Fuente: elaboración propia. Basado en Gutiérrez Hernández (2025).

Según con los datos de Gutiérrez-Hernández et al. (2017) y Ben-Said & Sakar (2023), *A. pinsapo* y *A. marocana* se desarrollan bajo condiciones ambientales en gran medida comparables. Desde el punto de vista altitudinal, *A. pinsapo* ocupa un rango aproximado entre 700 y 1.700 m s. n. m., con bosques puros y presencia dominante mayormente entre 1.200–1.400 m; mientras que *A. marocana* se sitúa en cotas superiores, entre 1.500 y 2.100 m. En cuanto a la precipitación anual, ambas especies presentan valores óptimos muy próximos, característicos de ambientes montanos húmedos del Mediterráneo occidental, con precipitaciones en torno a 1.000 mm anuales. Desde el punto de vista térmico, ambas se sitúan en un ámbito con temperaturas medias anuales del orden de 12–14 °C, y temperaturas medias del mes más frío por debajo de los 5 °C. En ambos casos, la distribución espacial de las masas muestra una clara preferencia por umbrías (Figura 10), lo que pone de relieve la importancia de una insolación reducida para paliar el estrés hídrico estival, un rasgo ecológico común a ambos taxones (Lechuga et al., 2017).

Figura 10. Frecuencia de los registros de presencia de pinsapo según exposición



Fuente: elaboración propia. Basado en Gutiérrez-Hernández et al. (2017).

Desde el punto de vista de la clasificación climática de Köppen (Beck et al., 2018; Köppen, 1918), las áreas ocupadas por *A. pinsapo* y *A. marocana* se sitúan en el límite inferior térmico, pero en el límite superior hídrico, del clima mediterráneo templado de verano seco y templado (Csb). Se trata de ambientes montanos donde la marcada estacionalidad mediterránea, con sequía estival, se combina con temperaturas relativamente bajas, especialmente en invierno, y con precipitaciones elevadas, lo que sitúa a ambos taxones en una zona de transición entre el dominio mediterráneo templado y condiciones más frías asociadas a la altitud (Rubio Recio, 1989). No obstante, conviene aclarar que hasta ahora se han utilizado variables ambientales de distinta naturaleza y resolución espacial para caracterizar las condiciones ambientales de ambos taxones.

2.3. Necesidades de investigación sobre los abetales de la Reserva

2.3.1. Necesidad de investigación básica sobre los abetales bético-rifeños

A pesar del interés creciente por *A. pinsapo* y *A. marocana*, existe una brecha de conocimiento fundamental en el estudio integrado de los sistemas forestales que ambas especies conforman, derivada principalmente de la ausencia de un marco que permita analizar de manera comparable sus condiciones ambientales y su dinámica espaciotemporal (Gutiérrez-Hernández, 2025). Esta brecha se origina, en primer lugar, en la heterogeneidad de los datos y de las variables ambientales utilizadas hasta ahora, tanto en su naturaleza como en su resolución espacial y temporal, ya que se han combinado variables de procedencias y escalas distintas, lo que dificulta una caracterización ambiental homogénea y una comparación ecológica estricta entre ambos sistemas forestales.

Una cuestión central aún no resuelta en el estudio comparativo de *A. pinsapo* y *A. marocana* es hasta qué punto existe una equivalencia real de nicho ecológico entre ambos sistemas forestales, o si, por el contrario, el solapamiento observado es solo parcial y depende de la escala de análisis. Hasta ahora, este tipo de evaluación no se ha abordado mediante modelización del nicho a alta resolución en el caso de *A. marocana* (Alaoui et al., 2021; a una resolución de 1 km), y mucho menos de forma integrada para ambas especies; lo que impide discriminar con precisión entre similitud ecológica real y coincidencias aparentes derivadas de aproximaciones de baja resolución o de variables no homogéneas, y determinar la importancia preeminente de la topografía (exposición).

Persiste un vacío en la evaluación sistemática de las capacidades y limitaciones de los sensores remotos empleados para monitorizar estas formaciones forestales, ya que la resolución espacial, espectral y temporal de los distintos sensores condiciona la detección de patrones estructurales, espectrales y dinámicos a escala de paisaje. Sobre esta base, la comprensión de la dinámica de la vegetación, los patrones fenológicos y el comportamiento espectral sigue siendo parcial, al no integrarse de manera coherente con los resultados de la modelización del nicho ni con los efectos de escala asociados a los sensores. En particular, este tipo de análisis solo se ha abordado con *A. pinsapo* (Gutiérrez-Hernández et al., 2018), pero no se ha abordado de forma sistemática en el caso de *A. marocana* y, menos aún, desde una perspectiva comparada e integrada que incorpore conjuntamente ambos sistemas forestales, lo que impide determinar si existen similitudes o diferencias consistentes en las curvas fenológicas y si las tendencias estacionales e interanuales observadas en la señal de la vegetación son realmente comparables y estables en el tiempo.

En consecuencia, permanece sin resolver en qué medida estas diferencias o similitudes en la dinámica de la vegetación entre los abetales bético-rifeños podrían traducirse en respuestas diferenciales ante incrementos de temperatura o de aridez, y cuál de las dos especies podría mostrar una mayor capacidad de ajuste o tolerancia ante escenarios de cambio climático (Gutiérrez Hernández, 2018). En conjunto, estas lagunas de conocimiento básico restringen la evaluación consistente de la dinámica espacial y temporal, así como la generación y validación de escenarios de cambio ambiental y de distribución futura, lo que subraya la necesidad de un enfoque integrado que combine los mismos datos ambientales y metodologías espacialmente explícitas.

2.3.2. Necesidad de investigación aplicada sobre su problemática ambiental

En el ámbito de la investigación aplicada, persisten vacíos de conocimiento y necesidades críticas en el estudio de los abetales bético-rifeños en el contexto de la Reserva de la Biosfera Intercontinental del Mediterráneo, un territorio reconocido como uno de los principales puntos calientes de biodiversidad del ámbito mediterráneo, caracterizado por una elevada singularidad biogeográfica, altos niveles de endemismo y una marcada sensibilidad a los procesos de cambio ambiental (Costello et al., 2022; Cuttelod et al., 2008; Mendoza-Fernández et al., 2015; Rodríguez-Sánchez et al., 2008). A pesar de su alto valor ecológico y de su condición de sistemas forestales relictos y altamente protegidos, estos abetales no han sido analizados de manera suficientemente integrada desde una perspectiva aplicada que permita comprender su funcionamiento, su vulnerabilidad y su capacidad de respuesta frente a las presiones ambientales actuales y futuras.

A. pinsapo y *A. marocana* están catalogadas como especies en peligro de extinción (Alaoui et al., 2010; Arista et al., 2010). Esta condición responde a la convergencia de varios factores de presión que afectan directamente a la viabilidad de los sistemas forestales que los conforman, lo que obliga a reconducir los esfuerzos y prioridades de investigación (Ben-Said et al., 2024; Ben-Said & Sakar, 2023; Gutiérrez-Hernández, 2025). Los abetales bético-rifeños están sometidos a múltiples problemas y amenazas que comprometen su viabilidad ecológica y biogeográfica (Figura 11). Su distribución extremadamente restringida y fragmentada, junto con la pérdida y degradación del hábitat, limita la conectividad entre poblaciones y reduce su capacidad de recuperación ante perturbaciones. En determinadas áreas, estas dinámicas se ven agravadas por presiones antrópicas directas asociadas a cambios en el uso del suelo, como la expansión de cultivos de cannabis (Figura 12), que conllevan roturaciones, apertura de pistas, captación de agua y aumento del riesgo de incendios (Chergui et al., 2024). A ello se suma el impacto creciente de los incendios forestales, que representan una amenaza directa para la continuidad estructural y funcional de estos ecosistemas, especialmente en contextos mediterráneos montanos (Castro et al., 2022; Gutiérrez-Hernández et al., 2015). Las tendencias recientes asociadas al cambio climático, caracterizadas por el incremento de la aridez estival y de los extremos térmicos, intensifican el estrés ambiental en especies ya situadas en los márgenes climáticos de su distribución (Alaoui et al., 2021; Gutiérrez Hernández, 2018). Finalmente, la incidencia de patógenos forestales, a menudo favorecida por condiciones de estrés hídrico y térmico, actúa como un factor adicional de vulnerabilidad y puede desencadenar procesos de decaimiento y mortalidad que comprometen la estabilidad y la resiliencia a largo plazo de estos sistemas forestales (Navarro-Cerrillo et al., 2014, 2022).

Estas problemáticas resultan especialmente relevantes si se considera que ambos sistemas forestales se localizan en enclaves de máxima protección ambiental, dentro de Parques Nacionales y en la zona núcleo de una Reserva de la Biosfera intercontinental, lo que subraya su relevancia territorial, ecológica e internacional. En este contexto, se hace patente la necesidad de avanzar hacia enfoques coordinados de gestión e investigación (Price, 1996), que integren sistemas de información geográfica, modelos de distribución de especies, teledetección y evaluación de escenarios de cambio ambiental, con el fin de informar la planificación territorial, la gestión adaptativa y la toma de decisiones en marcos de conservación transnacional, alineando el

conocimiento científico con los retos socioambientales que afectan a uno de los paisajes forestales más singulares y vulnerables del Mediterráneo.

Figura 11. Problemas ambientales de los abetales bético-rifeños



Nota: procesos de decaimiento forestal (seca) en el pinsapar de Parauta (1, 2 y 3) y de Yunquera (4), pinsapo quemado en Los Reales de Sierra Bermeja (5), y antiguo pinsapar quemado en Cerro Abanto (6). Fuente: Ñito Salas, Diario Sur (1, 2, 3 y 6); Rafael Flores Domínguez, RF Natura (4); Diario Málaga Hoy.

Figura 12. *Science* se hizo eco de la degradación ambiental en Talassemtane



LETTERS

Cannabis farming has expanded in Morocco's Talassemtane National Park, a biodiversity hotspot.

PHOTO: JG. PAUSAS

Edited by **Jennifer Sills**

Moroccan cannabis farms threaten biodiversity

Talassemtane National Park, located in Morocco's Rif region, is part of the Intercontinental Biosphere Reserve of the Mediterranean (*1*) and is on the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO)'s list of tentative world heritage sites for future nomination (*1*). Agricultural activities in the region predated the park's establishment and have continued to take place legally within its borders. However, Morocco must address the recent expansion of cannabis (marijuana) farms, which put the park's biodiversity at risk.

A biodiversity hotspot (*2*), Talassemtane National Park features diverse ecosystems, primarily natural coniferous forests with patches of rare tree species, including the Moroccan fir (*Abies marocana*, a subpopulation of *Abies pinsapo*), which is endemic to the park, and the Atlas cedar (*Cedrus atlantica*), which is endemic to North Africa. Both of these species have been designated Endangered by the International Union for Conservation of Nature (*3*, *4*) and hold high evolutionary value (*5*, *6*). The park is also home to a range of endangered fauna, including the iconic Barbary macaque (*Macaca sylvanus*) (*7*).

Small villages within the park have traditionally cultivated various crops, including cereals and cannabis, but in recent decades, there has been a shift toward large-scale cannabis monocultures (*8*). Farmers expand cannabis cultivation by burning forests and clearing native vegetation. Slopes are sometimes flattened or terraced before cultivation, which exacerbates land degradation. As a result, the park lost 2850 ha of forest (4.8% of the park) between 2001 and 2018 (*9*); between 1995 and 2020, the park lost 2979 ha of forest (5% of the park) (*10*). Intentionally set fires often spread beyond the planned cultivation area, and burned areas are used to expand cannabis crops further. Forest fires burned 4440 ha (7.5% of the park) between 2001 and 2018 (*7*).

Current deforestation trends in the Talassemtane National Park vastly outpace traditional practices. To protect biodiversity in the region, the Moroccan National Agency for Water and Forests should enforce strict regulations, including sanctions when needed, to halt the expansion of cannabis plantations. The agency should also restore forests that have been illegally destroyed. Clarifying land ownership and establishing a supervisory committee would help ensure proper implementation of these actions. In addition, diversifying the local economy through initiatives such as ecotourism could reduce reliance on forest resources and improve livelihoods.

Brahim Chergui[1], Soumia Fahd[1], Xavier Santos[2], Juli G. Pausas[3]*
[1]Laboratoire Écologie, Systématique, Conservation de la Biodiversité, Unité de Recherche Labellisée Centre National de Recherche Scientifique et Technique N° 18, Faculté des Sciences, Abdelmalek Essaadi University, Tétouan, Morocco. [2]Centro de Investigação em Biodiversidade e Recursos Genéticos, Campus de Vairão, Universidade do Porto, 4485-661 Vairão, Portugal. [3]Centro de Investigación sobre Desertificación, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Universitat de València, Generalitat Valenciana, 46013 Moncada, Valencia, Spain.
*Corresponding author. Email: juli.g.pausas@csic.es

REFERENCES AND NOTES

1. A. Aoulad-Sidi-Mhend *et al.*, *Geoheritage* **11**, 1005 (2019).
2. E. M. Valderrábano, T. Gil, V. Heywood, B. d. Montmollin, Eds., "Conserving wild plants in the south and east Mediterranean region" (International Union for Conservation of Nature, 2018).
3. IUCN Red List, *Cedrus atlantica*; https://www.iucnredlist.org/species/42303/2970715.
4. IUCN Red List, *Abies pinsapo*; https://www.iucnredlist.org/species/42295/10679577.
5. J. C. Linares, *J. Biogeog.* **38**, 619 (2011).
6. M. Ben-Said, E. H. Sakar, *Folia Geobot.* **58**, 31 (2023).
7. IUCN Red List, *Macaca sylvanus*; https://www.iucnredlist.org/species/12561/50043570.
8. P. A. Chouvy, J. Macfarlane, *Intern. J. Drug Policy* **58**, 85 (2018).
9. I. Castro *et al.*, *Fire* **5**, 51 (2022).
10. Z. Beroui, 2020, "Contribution à la mise en place d'un système de suivi écologique de la biodiversité des écosystèmes forestiers du Parc National de Talassemtane (Rif Occidental, NO Maroc) [in French]," Memoire de 3ème cycle (Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs, 2020); https://drive.google.com/file/d/17SmN_rddlqLXOZjU-ONkjM-VHo5sWPB/view.

10.1126/science.adq5140

Safeguard the endemic species of Honduras

The Swan Islands, three remote islands in the Caribbean Sea, are home to several endemic species. In 1991, the islands were designated as the Abogado Agustín Córdoba Rodríguez Marine National Park (*1*). However, the Honduran Naval Force has custody of the islands (*1*), and researchers are often denied access to them (*2*). The Honduran government is now moving forward with plans to establish a correctional facility for prisoners within the park's

Downloaded from https://www.science.org at Universidad de Valencia on August 29, 2024

Nota: Artículo publicado en la revista científica Science (agosto de 2024), una de las más importantes e influyentes a escala internacional, que documenta la expansión reciente del cultivo de cannabis en el Parque Nacional de Talassemtane, en un contexto asociado a procesos de degradación del hábitat y a impactos significativos en uno de los puntos calientes de la biodiversidad del Mediterráneo occidental. Se destaca su protección como Reserva de la Biosfera Intercontinental del Mediterráneo, así como su candidatura a Patrimonio Mundial de la Humanidad. Fuente: Chergui et al. (2024).

3. Objetivos

En coherencia con el enfoque del proyecto y con los principales vacíos de conocimiento identificados en el estudio de los abetales endémicos de la Reserva de la Biosfera Intercontinental del Mediterráneo, se plantean los siguientes objetivos.

3.1. Objetivo general

- Analizar de forma integrada las conexiones biogeográficas, la dinámica ambiental y la respuesta frente a las crisis ambientales de los abetales endémicos de la Reserva de la Biosfera Intercontinental del Mediterráneo, con el fin de generar conocimiento aplicable a la gestión adaptativa de estos sistemas forestales singulares.

3.2. Objetivos específicos

- OE1. Desarrollar un Sistema de Información Geográfica (SIG) integrado que permita organizar y homogeneizar la información ambiental, espacial y espectral de los abetales bético-rifeños.
- OE2. Modelizar las distribuciones biogeográficas y analizar las conexiones espaciales y ambientales entre los sistemas forestales del Arco Bético-Rifeño.
- OE3. Monitorizar y modelizar la dinámica ambiental y espectral mediante sensores remotos, como herramienta para la detección de cambios estructurales y funcionales.
- OE4. Evaluar las tendencias estacionales e interanuales, así como posibles rupturas en la dinámica de la vegetación, en relación con las presiones climáticas y las perturbaciones.
- OE5. Generar y evaluar escenarios de cambio ambiental y de distribución futura, orientados a apoyar estrategias de gestión adaptativa.

3.3. Articulación y naturaleza de los objetivos del proyecto

Los objetivos específicos del proyecto no se conciben como fases estrictamente secuenciales ni como etapas cerradas en el tiempo, sino como ejes conceptuales interrelacionados que abordan distintas dimensiones del problema de investigación (Figura 13). En consecuencia, el orden en que se presentan responde a criterios de claridad expositiva y coherencia temática, y no implica una jerarquía temporal ni una dependencia cronológica rígida entre ellos.

Esta formulación responde a la naturaleza integrada del problema de investigación —las conexiones biogeográficas, la dinámica ambiental y la respuesta frente a perturbaciones de los abetales endémicos— y a la necesidad de combinar enfoques espaciales, temporales y funcionales de manera integrada, evitando aproximaciones lineales que resultarían insuficientes para capturar la complejidad de estos sistemas forestales.

En este sentido, los objetivos planteados presentan interdependencias conceptuales y metodológicas, de modo que los avances alcanzados en uno de ellos alimentan, matizan y refuerzan el desarrollo de los demás. Así, el Sistema de Información Geográfica definido en el OE1 constituye una infraestructura transversal y evolutiva, que sustenta la modelización biogeográfica (OE2), la

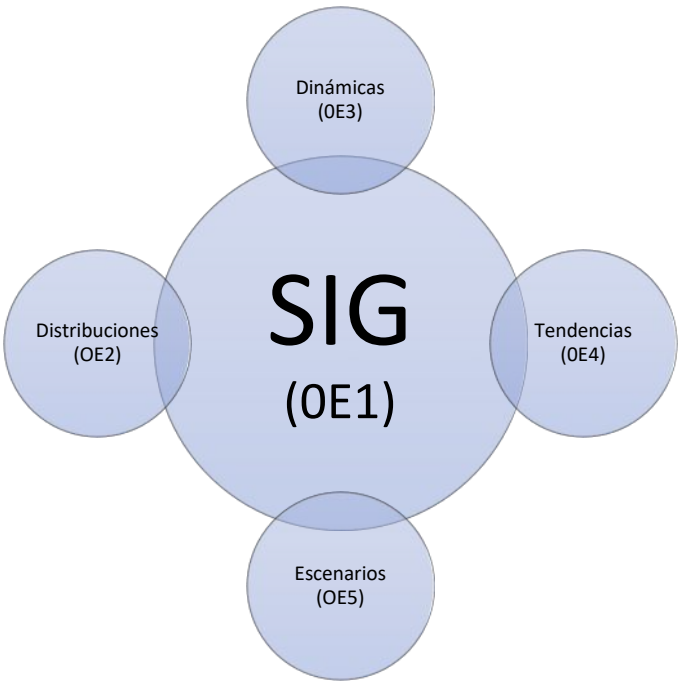
monitorización ambiental y espectral (OE3), el análisis de tendencias y rupturas (OE4) y la generación de escenarios de cambio (OE5), al tiempo que se enriquece progresivamente con los resultados generados en estos objetivos.

Del mismo modo, los análisis dinámicos y espectrales no se limitan a una fase concreta del proyecto ni se subordinan a una secuencia predefinida, sino que se integran de forma iterativa en la interpretación biogeográfica y en la evaluación de escenarios futuros, lo que permite ajustes metodológicos y refinamientos analíticos conforme se consolida el conocimiento del sistema estudiado.

La planificación temporal del proyecto se articulará, como se detalla más adelante en el *Plan de Trabajo*, a nivel de actividades y no de objetivos, lo que permitirá solapamientos estratégicos, retroalimentación continua entre resultados y una integración progresiva del conocimiento generado a lo largo de los tres años de ejecución. Este enfoque garantiza que el desarrollo del proyecto no dependa de la finalización completa de un objetivo para iniciar otro, sino de la disponibilidad y la madurez relativas de los resultados parciales obtenidos.

En conjunto, esta estructura flexible favorece tanto la coherencia científica y la viabilidad operativa del proyecto como su capacidad de adaptación a la complejidad inherente a los sistemas forestales estudiados, y resulta especialmente adecuada para orientar los resultados hacia aplicaciones prácticas en el ámbito de la gestión adaptativa, reforzando el valor añadido y la transferencia del conocimiento generado.

Figura 13. Articulación operativa de los objetivos específicos del proyecto



Fuente: elaboración propia.

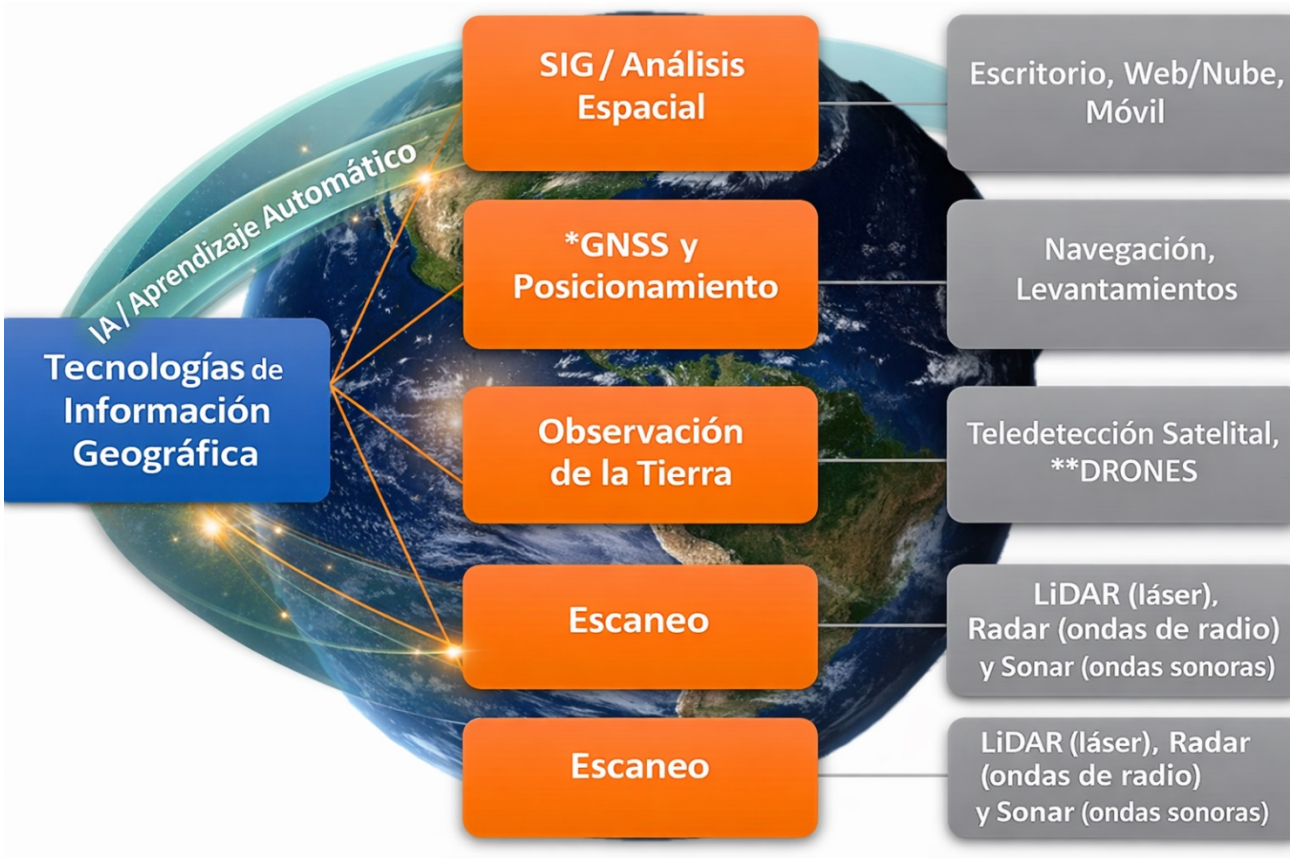
4. Marco metodológico

Con el objetivo de articular un enfoque integrado, coherente y metodológicamente sólido, y de alinear explícitamente los objetivos del proyecto con las actividades del plan de trabajo, se define el presente marco metodológico, que precede al desarrollo operativo del plan de trabajo y se alinea con el perfil del investigador principal.

4.1. Tecnologías de la información geográfica

Bajo la denominación tecnologías de la información geográfica (TIG) se agrupa un conjunto diverso de herramientas, métodos y enfoques orientados al análisis del territorio, que abarca desde disciplinas clásicas y consolidadas como la cartografía, la geodesia y la fotogrametría, así como tecnologías ya plenamente asentadas como la teledetección y los sistemas de información geográfica (Quirós Hernández, 2011), hasta desarrollos más recientes vinculados al *web mapping* y a los servicios geoespaciales en línea (Bajjali, 2023), y al uso creciente de técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático (Mai et al., 2025).

Figura 14. Tecnologías de la Información Geográfica



Fuente: elaboración propia. Adaptado de Schwartz-Belkin & Portman (2023). Nota: ∗ Global Navigation Satellite System (GNSS), including GPS. ∗∗ Dynamic Remotely Operated Navigation Equipment (DRONES).

En el ámbito de la geografía, las tecnologías de la información geográfica han sido progresivamente asumidas como parte constitutiva del núcleo del campo (Chuvieco et al., 2005; Konstantakatos & Galani, 2023; Lü et al., 2019), al permitir abordar explícitamente la dimensión espacial de los procesos ambientales y territoriales. Por tanto, las tecnologías de la información geográfica se asumen en este proyecto como parte central del enfoque metodológico, y no únicamente como herramientas instrumentales, al proporcionar el marco espacial y operacional en el que se integran, organizan y analizan de forma coherente los datos espaciales y temporales asociados a los abetales bético-rifeños.

Esta elección responde, además, a una necesidad derivada de la ausencia de un sistema de información geográfica (SIG) integrado a escala de la Reserva de la Biosfera Intercontinental del Mediterráneo, que permita articular la información ambiental, territorial y espectral disponible (Gutiérrez-Hernández, 2025). En este contexto, el SIG no solo facilita la homogeneización de fuentes y escalas, sino que constituye la base para una lectura espacialmente explícita de los procesos ecológicos, de su dinámica reciente y de su evolución potencial, reforzando un enfoque integrado y coherente en el análisis de estos sistemas forestales singulares y la toma de decisiones (Escandón-Panchana et al., 2025).

Desde esta concepción, el uso de un SIG permite gestionar de manera consistente la heterogeneidad de fuentes, escalas y resoluciones, garantizando la correspondencia espacial entre las distintas capas de información empleadas en la modelización del nicho ecológico, el análisis de la dinámica socioecológica y la evaluación de escenarios de cambio (Musikhin & Karpik, 2023). El SIG actúa como una infraestructura analítica central que articula los objetivos del proyecto con las actividades del plan de trabajo y posibilita una interpretación espacialmente explícita de los procesos biogeográficos (Felicísimo & Gómez-Muñoz, 2004; Felicísimo et al., 2002; Lomolino et al., 2016). Finalmente, las Tecnologías de la Información Geográfica permitirán la difusión e intercambio de la información generada a través de plataformas en la nube, facilitando el acceso, la interoperabilidad y la colaboración entre los distintos agentes implicados en un contexto de cooperación internacional.

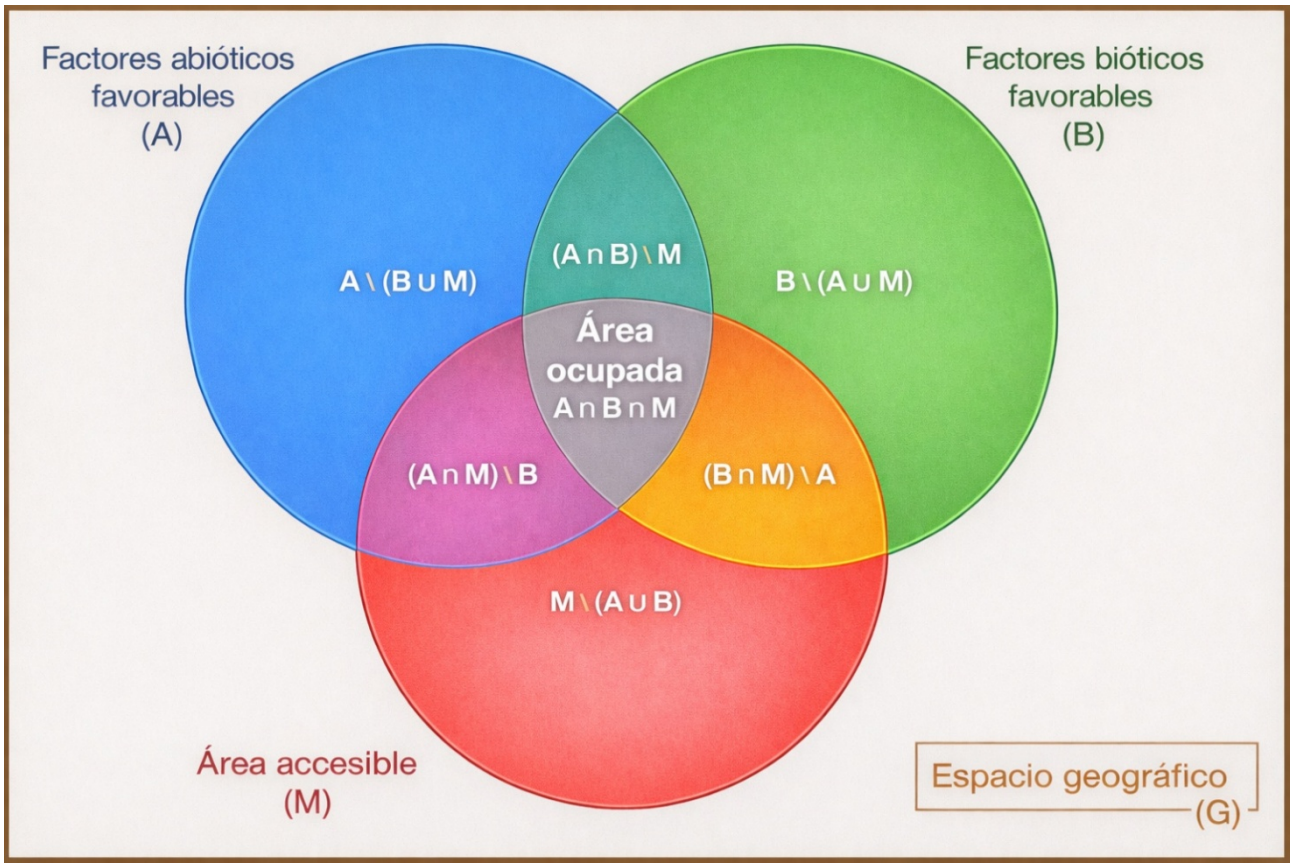
4.2. Modelos predictivos en biogeografía

El empleo de modelos predictivos en biogeografía se fundamenta en el reconocimiento de que los registros de presencia disponibles para la mayoría de las especies rara vez reflejan de forma completa su distribución potencial (Gutiérrez Hernández et al., 2018).

En efecto, las distribuciones observadas corresponden, en la mayoría de los casos, a distribuciones incompletas, denominadas nichos realizados (Soberon & Arroyo-Peña, 2017), condicionadas por procesos históricos, limitaciones de dispersión, presiones antrópicas o dinámicas recientes de fragmentación y contracción del hábitat (Soberón, 2007; Soberon & Peterson, 2005). En este contexto, los modelos de nicho ecológico proporcionan un marco conceptual adecuado para analizar la relación entre las especies y los gradientes ambientales, a partir de información espacial incompleta (Guisan & Zimmermann, 2000; Peterson et al., 2011). El

diagrama BAM (Soberon & Peterson, 2005) muestra que la distribución de una especie depende simultáneamente de factores abióticos, bióticos y de accesibilidad geográfica (Figura 15).

Figura 15. Diagrama de BAM



Fuente: elaboración propia. Basado en Soberon & Peterson (2005) & Soberón (2007). Nota: La figura representa el marco conceptual BAM (Biotic–Abiotic–Movement), en el que la distribución geográfica observada de una especie resulta de la interacción entre las condiciones abióticas adecuadas (A), las interacciones bióticas favorables (B) y la accesibilidad espacial determinada por los procesos históricos y contemporáneos de dispersión (M), todo ello dentro del espacio geográfico de estudio (G). La intersección de estos tres componentes, A ∩ B ∩ M, define el área efectivamente ocupada por la especie y corresponde al nicho realizado. Las áreas pertenecientes exclusivamente al conjunto A \ (B ∪ M) corresponden a regiones ambientalmente adecuadas, pero biológicamente desfavorables y/o inaccesibles, donde la ausencia se explica por exclusión biótica o por limitaciones de dispersión. De forma análoga, las áreas exclusivas de B \ (A ∪ M) representan zonas biológicamente favorables, pero ambientalmente inadecuadas y/o inaccesibles. Por su parte, las áreas exclusivas de M \ (A ∪ B) identifican regiones accesibles desde el punto de vista espacial, pero carentes de condiciones ambientales y bióticas apropiadas para sostener poblaciones viables, aunque en algunos casos pueden registrarse presencias asociadas a poblaciones sumidero en condiciones bióticas y abióticas inadecuadas, posiblemente debidas a efectos históricos (por ejemplo, árboles que persisten en condiciones desfavorables). La intersección (A ∩ B) \ M define un hábitat ambiental y biológicamente adecuado, pero inaccesible, donde las ausencias son contingentes y reflejan restricciones históricas o barreras de dispersión. La intersección (A ∩ M) \ B corresponde a áreas ambientalmente adecuadas y accesibles en las que la especie está ausente principalmente por exclusión biótica, como consecuencia de competencia intensa u otras interacciones negativas. Por su parte, la intersección (B ∩ M) \ A identifica áreas biológicamente favorables y accesibles, pero ambientalmente inviables, donde predominan las ausencias debidas a limitaciones abióticas, aunque pueden

registrarse procesos de colonización fuera del ambiente adecuado, posiblemente debidos a facilitación, dando lugar a poblaciones sumidero que no son autosuficientes. Finalmente, este marco conceptual evidencia que la distribución observada, A ∩ B ∩ M, constituye siempre un subconjunto del nicho potencial, y se encuentra restringida simultáneamente por factores ambientales, interacciones bióticas, procesos de dispersión y efectos históricos, lo que subraya la complejidad inherente a la interpretación ecológica de los rangos geográficos de las especies.

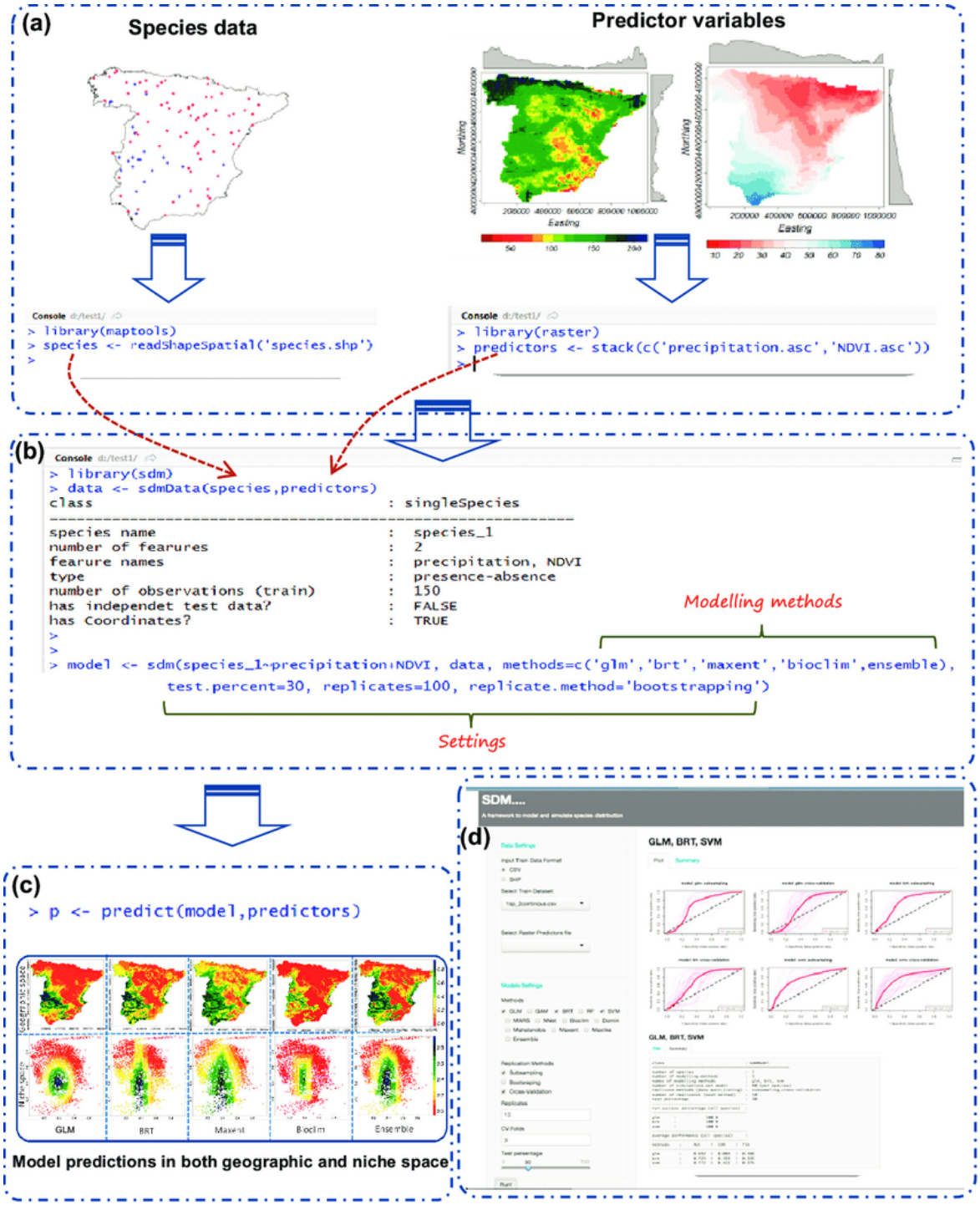
Desde este enfoque, los modelos de idoneidad de hábitat y los modelos de distribución de especies se conciben como herramientas que permiten trasladar el concepto de nicho ecológico al espacio geográfico mediante la generación de resultados espacialmente explícitos (Franklin, 2010). Su objetivo no es la predicción determinista de la distribución real de las especies, sino la caracterización probabilista de patrones relativos de idoneidad ambiental, consistentes con su ecología y con su capacidad potencial de persistencia, más allá de los límites de su distribución actualmente observada (Peterson et al., 2015). Este planteamiento resulta especialmente pertinente en sistemas sometidos a fuertes restricciones históricas y espaciales como los abetales, donde la ausencia de una especie no puede interpretarse directamente como la ausencia de condiciones favorables (Lobo et al., 2010).

La aplicación de este tipo de modelos adquiere una relevancia particular en el caso de especies relictas y amenazadas, como *A. pinsapo* y *A. marocana*, cuya distribución actual es extremadamente reducida y fragmentada y se sitúa en los márgenes climáticos y biogeográficos de su rango (Gutiérrez-Hernández, 2025). En estos casos, la modelización del nicho ecológico permite explorar la coherencia entre la distribución observada y el espacio ambiental potencial, contribuyendo a diferenciar las limitaciones impuestas por las condiciones ambientales actuales de las derivadas de factores históricos, antrópicos o de conectividad espacial (Soberón et al., 2017). A partir de este planteamiento, los modelos se emplean para analizar explícitamente la relación entre los registros de presencia disponibles y el conjunto de variables ambientales consideradas, con el objetivo de identificar los factores que ejercen mayor influencia en la distribución de las especies (Fourcade et al., 2018; Gutiérrez-Hernández & García, 2026). Este análisis permite evaluar la contribución relativa de las distintas variables topográficas, climáticas o antrópicas, así como su coherencia ecológica, y proporciona una base cuantitativa para interpretar los condicionantes ambientales que estructuran el hábitat de cada especie (Fourcade et al., 2018; Mod et al., 2016; Sanguet et al., 2022).

Sobre esta base estadística (inferencial), la modelización en este proyecto se orienta al análisis comparativo entre *A. pinsapo* y *A. marocana*, lo que permitirá identificar semejanzas y diferencias en la estructura de sus nichos ecológicos y en su respuesta a los gradientes ambientales (Warren et al., 2019). El carácter espacialmente explícito de los resultados facilitará la evaluación del grado de solapamiento o divergencia entre ambas especies y constituirá el fundamento para la proyección de los modelos a otros escenarios ambientales (Araújo & New, 2007; Araújo & Rahbek, 2006), tanto espaciales como temporales, con el fin de analizar su comportamiento potencial bajo condiciones ambientales distintas a las actualmente observadas (Harris et al., 2014).

La Figura 16 representa el flujo de trabajo empleado en el modelado de distribución de especies con la librería *sdm* en R (Naimi et al., 2026; Naimi & Araújo, 2016), incluyendo la preparación de datos, la calibración de modelos y la generación de predicciones espaciales.

Figura 16. Modelos predictivos en biogeografía

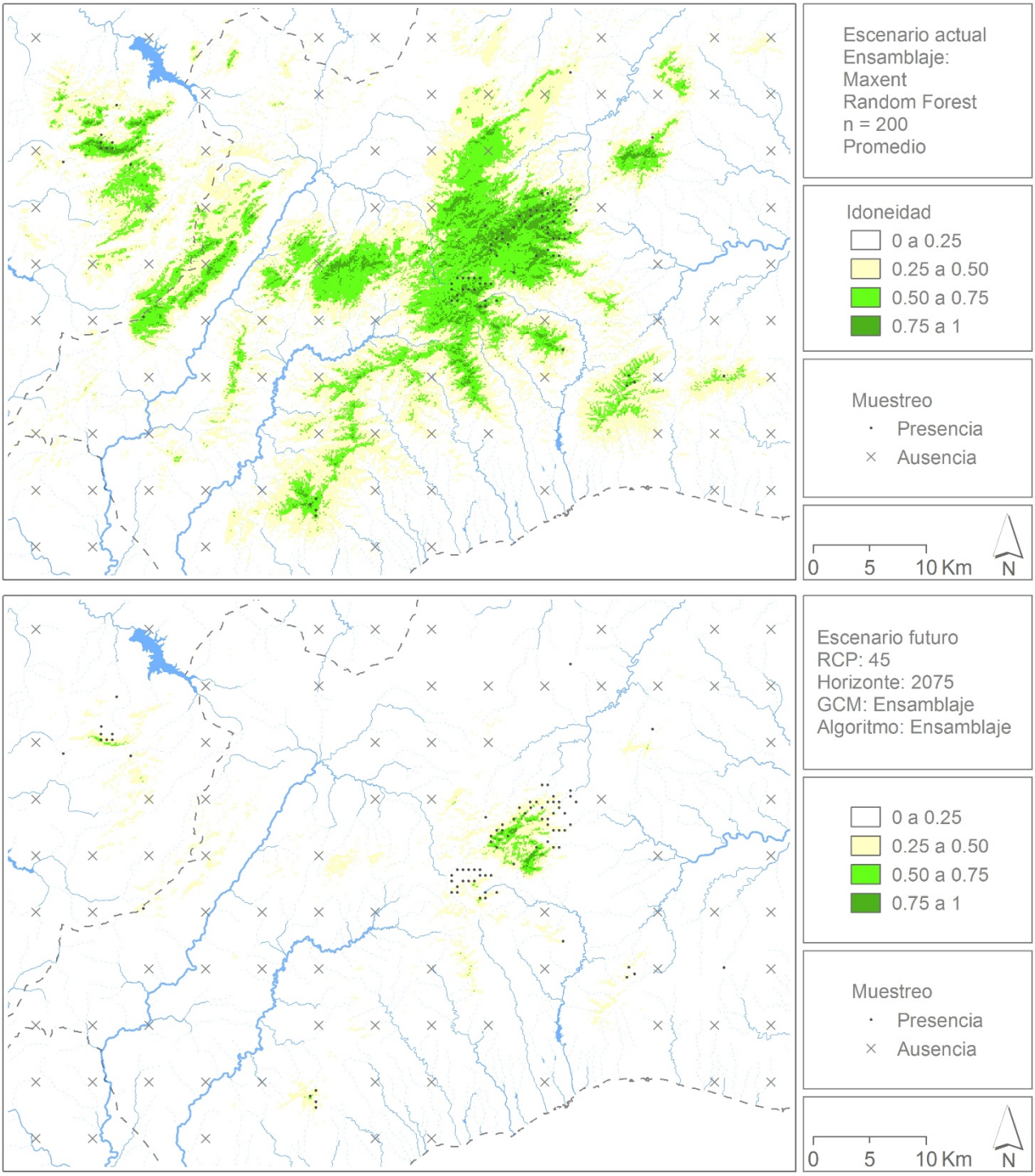


Fuente: Naimi & Araújo (2016).

El flujo de trabajo descrito en la Figura 16 se aplicó con éxito en una investigación (Gutiérrez Hernández, 2018) reconocida con el Premio "Jesús García Fernández" (IV edición) para jóvenes investigadores de la Asociación Española de Geografía (AGE), centrado en el análisis de la distribución potencial y la supervivencia del pinsapo (*A. pinsapo*), donde permitió integrar de forma

reproducible información ambiental, registros de ocurrencia y ensamblaje de modelos para evaluar patrones de idoneidad de hábitat bajo distintos escenarios de cambio climático (Figura 17).

Figura 17. Escenarios actual y futuro del hábitat de *Abies pinsapo*

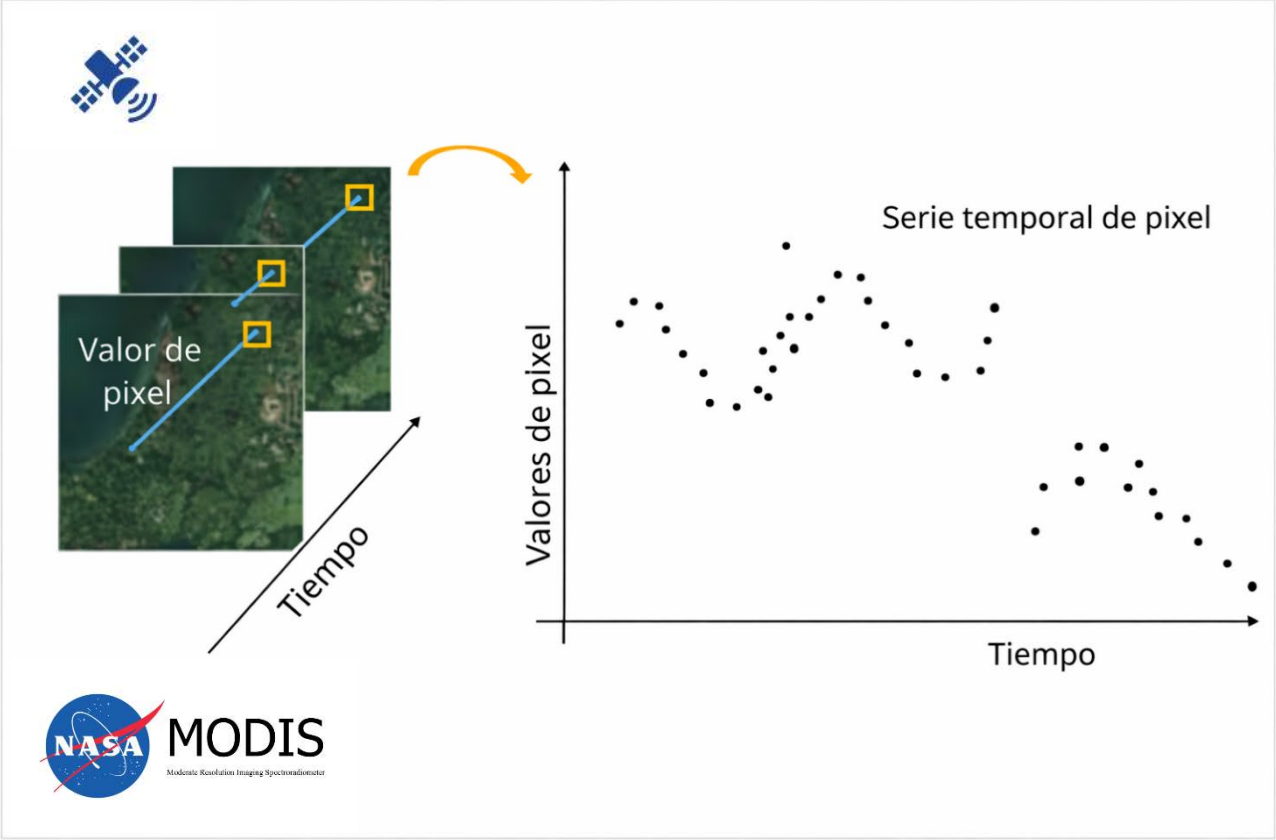


Fuente: Gutiérrez Hernández (2018).

4.3. Monitorización ambiental con sensores remotos

La monitorización ambiental mediante sensores remotos constituye un componente esencial del marco metodológico del proyecto, al permitir la observación sistemática, repetible y espacialmente continua de variables ambientales clave a escalas espaciales y temporales coherentes con los procesos ecológicos analizados (Eerens et al., 2014; Ma et al., 2022; Randin et al., 2020). En este sentido, la teledetección proporciona información objetiva y homogénea sobre el estado y la dinámica de la superficie terrestre (Chuvieco, 2008), superando las limitaciones inherentes a los datos de campo puntuales y facilitando el análisis de áreas extensas, de difícil acceso o transfronterizas, como ocurre en el ámbito bético-rifeño. La Figura 18 muestra el proceso de extracción de una serie temporal a partir de un conjunto de imágenes satelitales multitemporales de MODIS, tomadas en distintas fechas. Para una misma localización espacial, el valor del píxel se recupera en cada imagen del conjunto, lo que genera una secuencia temporal que permite analizar la evolución de la variable observada. Este enfoque es fundamental en estudios de dinámica temporal, detección de cambios, análisis fenológico y monitorización ambiental mediante teledetección.

Figura 18. Extracción de una serie temporal a partir de imágenes multitemporales

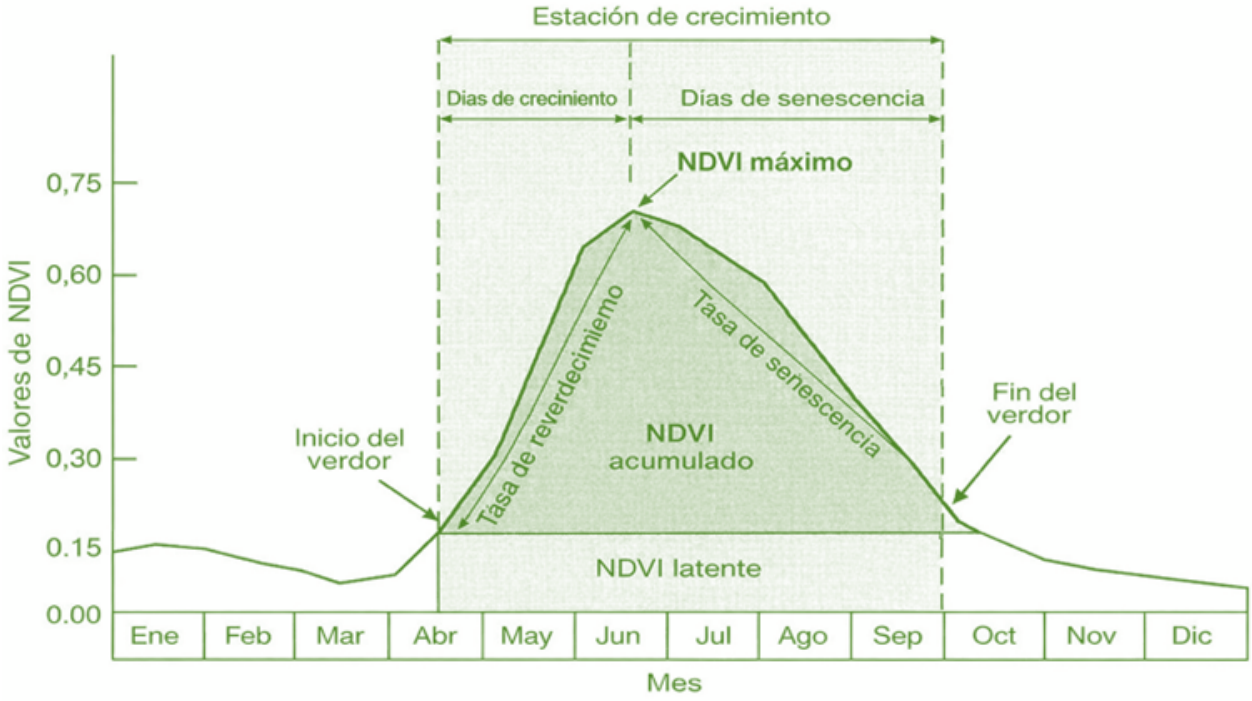


Fuente: Adaptado de ESRI.

En este proyecto, los sensores remotos se emplearán para caracterizar tanto la estructura como el funcionamiento de los ecosistemas forestales mediante variables espectrales y productos

derivados asociados (Jones & Vaughan, 2010). El análisis fenológico (Schwartz, 2013), basado en series temporales de índices de vegetación, permite describir patrones estacionales e interanuales en el desarrollo y la senescencia de la cubierta vegetal, aportando información clave sobre la respuesta funcional de los ecosistemas a la variabilidad climática y a las perturbaciones ambientales (Caparros-Santiago et al., 2021; Helman, 2018; Reed et al., 2009). La Figura 19 muestra la caracterización tipo del ciclo anual del NDVI (similar en cualquier índice de vegetación) y la identificación de las principales fases fenológicas de la vegetación a lo largo del ciclo estacional (Griffith et al., 2002). Se delimitan el inicio y el fin del verdor, la estación de crecimiento, el valor máximo de NDVI, así como las tasas de reverdecimiento y de senescencia. Asimismo, se representan el NDVI acumulado durante la estación activa y el NDVI latente (nivel basal) fuera de dicho periodo. Esta caracterización permite analizar de forma integrada la dinámica temporal de la vegetación, facilitando la comparación entre regiones, coberturas vegetales o escenarios climáticos (Reed et al., 2009).

Figura 19. Curva fenológica anual basada en el NDVI



Fuente: adaptado de Griffith et al. (2002).

En este contexto, se emplearán principalmente los índices NDVI y EVI, debido a su amplio uso consolidado en estudios fenológicos. Mientras que el NDVI proporciona una medida sencilla y robusta de la actividad fotosintética (Rouse et al., 1974), el EVI ofrece mejoras sustanciales al presentar una mayor sensibilidad en áreas de alta biomasa, reducir los problemas de saturación en coberturas densas, minimizar la influencia del fondo del suelo y corregir parcialmente los efectos atmosféricos mediante coeficientes de ajuste (Huete et al., 2002), lo que permite una caracterización más precisa de la dinámica de la vegetación, especialmente en ecosistemas forestales complejos y densos , como los pinsapares.

La información utilizada proviene de distintos programas de observación de la Tierra que ofrecen una combinación complementaria de resoluciones espaciales, temporales y espectrales (Kuenzer et al., 2015a, 2015b). En particular, se emplean series temporales de sensores de media resolución espacial y alta frecuencia temporal, como Landsat (Wulder et al., 2022), Sentinel y MODIS, que permiten analizar la dinámica estacional e interanual de la vegetación y detectar tendencias ambientales a mediano y largo plazo. De forma complementaria, es posible recurrir a datos de alta resolución espacial procedentes de sensores como Pléiades (Airbus), que facilitan una caracterización más detallada de la estructura del paisaje, la fragmentación del hábitat y los patrones espaciales finos asociados a los abetales.

Los productos derivados de la teledetección se integran explícitamente en el marco de las TIG, asegurando su coherencia espacial con el resto de las variables ambientales empleadas en los modelos de nicho ecológico e idoneidad de hábitat. Este carácter espacialmente explícito permitirá vincular directamente los patrones espectrales y fenológicos observados con los registros de presencia de las especies y con los gradientes ambientales analizados, reforzando la interpretación ecológica de los resultados y su consistencia a distintas escalas (Sanguet et al., 2022; Zhu, 2021).

Desde una perspectiva metodológica, la monitorización y modelización ambiental con sensores remotos no se conciben como un fin en sí mismo, sino como una fuente fundamental de variables explicativas e información independiente que alimenta y complementa los modelos predictivos desarrollados en el proyecto. De este modo, la integración de datos provenientes de diversos sensores proporcionará una base sólida para el análisis de tendencias ambientales, el control estadístico de la señal espacial y temporal, y la evaluación de escenarios de cambio abordados en los apartados posteriores.

4.4. Pruebas de tendencia estacional e interanual

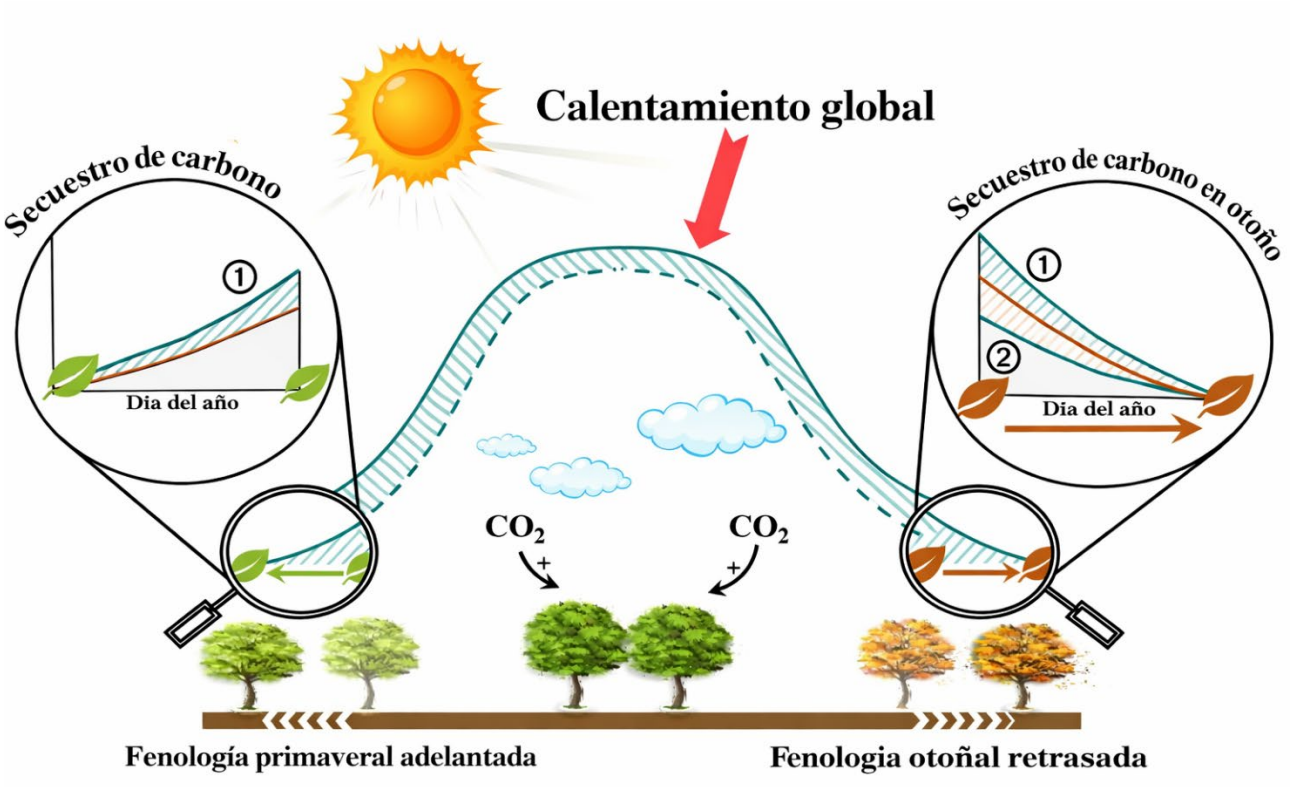
La dinámica de la vegetación se refiere al conjunto de variaciones espaciales y temporales que experimenta la cubierta vegetal en términos de actividad fotosintética, productividad vegetal y fenología como respuesta a la variabilidad climática, a las condiciones ambientales locales y a las perturbaciones naturales o antrópicas (Eamus et al., 2016). El análisis de esta dinámica permite evaluar tanto los cambios a largo plazo en el funcionamiento de los ecosistemas como las oscilaciones estacionales recurrentes que caracterizan su comportamiento anual.

En este proyecto, la dinámica de la vegetación se analizará a partir de series temporales derivadas de sensores remotos, abordando de forma complementaria su dimensión estacional y su tendencia interanual. Este enfoque se apoya en la experiencia investigadora previa del equipo en el análisis de dinámicas vegetales a escala de biomas (Gutiérrez-Hernández & García, 2024b) y en su aplicación al estudio específico de *A. pinsapo* (Gutiérrez Hernández & Gutiérrez-Hernández, 2019; Gutiérrez-Hernández et al., 2018).

En una primera fase, la componente estacional se modeliza mediante regresiones armónicas, que permiten describir la periodicidad, la amplitud y la fase de los ciclos fenológicos, proporcionando una representación continua de la señal estacional y facilitando la identificación de

cambios en el momento y la intensidad de la actividad fotosintética. Una vez caracterizada explícitamente la estacionalidad, la tendencia interanual se analiza mediante pruebas estadísticas robustas orientadas a detectar tendencias sistémicas de largo plazo (Figura 20). En particular, se aplicará la prueba no paramétrica de Mann–Kendall (Kendall, 1975; Mann, 1945), adecuada para series temporales ambientales que no cumplen los supuestos de normalidad, junto con el estimador de pendiente de Theil–Sen (Sen, 1968; Theil, 1950), que permite cuantificar de forma robusta la magnitud del cambio. De forma complementaria, se empleará el análisis de tendencia estacional (Seasonal Trend Analysis, STA) para evaluar la tendencia residual una vez considerada la componente estacional (Eastman et al., 2009, 2013).

Figura 20. Tendencias en la estacionalidad debidas al calentamiento global



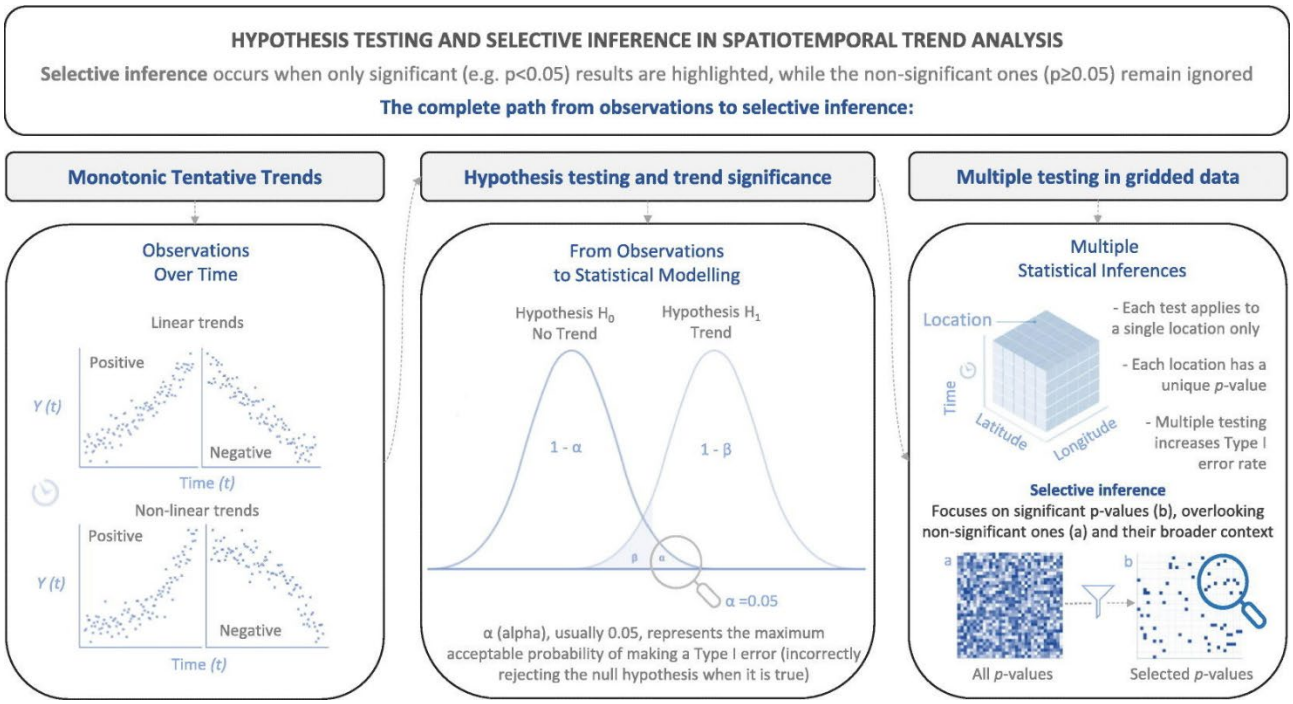
Fuente: adaptado de Chen et al. (2022).

Los resultados de las distintas pruebas de tendencia se analizarán de forma espacialmente explícita, lo que permitirá evaluar la coherencia y la heterogeneidad espaciales de los cambios detectados, así como su relación con los gradientes ambientales y biogeográficos considerados. Este enfoque, que ya ha sido aplicado con éxito tanto a escala de cobertura como a escala de bioma en estudios previos (Gutiérrez-Hernández et al., 2018; Gutiérrez-Hernández & García, 2021, 2024b)Proporciona una base metodológica sólida para el control posterior del error estadístico y espacial en análisis multivariantes y multiescalares, que se abordará de forma específica en el apartado siguiente.

4.5. Control del error estadístico y espacial

En los análisis de tendencias espaciotemporales se realizan miles de pruebas estadísticas simultáneamente, una por cada píxel. Cuando se interpreta únicamente si un resultado es significativo o no utilizando un umbral fijo (por ejemplo, α = 0.05), sin tener en cuenta el número total de pruebas realizadas, se incurre en inferencia selectiva (Benjamini, 2010b, 2020; Oliver Gutiérrez-Hernández & García, 2025c), lo que incrementa notablemente el riesgo de obtener resultados falsos positivos (Figura 21). Este problema se conoce como el problema de las comparaciones múltiples, pruebas múltiples, o simplemente, multiplicidad (Bender & Lange, 2001; James et al., 2021; Shaffer, 1995; Streiner & Norman, 2011). En este contexto, la significación estadística de un resultado no puede evaluarse de forma aislada, ya que depende del conjunto completo de pruebas realizadas. Ignorar esta condición genera una apariencia engañosa de patrones significativos que desaparecen al aplicar métodos adecuados de corrección.

Figura 21. Pruebas de tendencia e inferencia selectiva



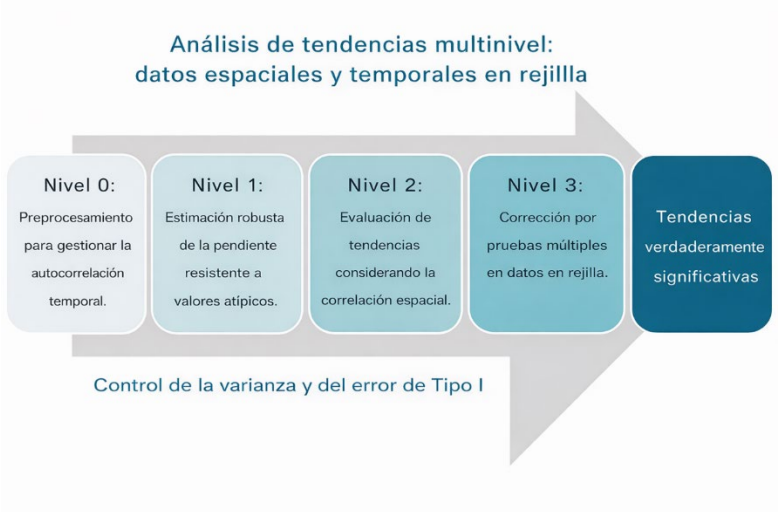
Fuente: Oliver Gutiérrez-Hernández & García (2025c).

Por ello, en este proyecto se aplicarán procedimientos de corrección mediante múltiples contrastes que permiten controlar el número esperado de resultados erróneos, garantizando una interpretación más realista, robusta y reproducible de las tendencias detectadas. Este enfoque resulta esencial para evitar sobreestimar la extensión espacial de los cambios y asegurar la fiabilidad de las conclusiones obtenidas (Oliver Gutiérrez-Hernández & García, 2025a). En este proyecto, este enfoque se aplicará específicamente a las pruebas de tendencia espaciotemporales realizadas en cada píxel (Oliver Gutiérrez-Hernández & García, 2025b). Cada tendencia se evaluará mediante su valor *p*, pero, a diferencia del enfoque clásico no corregido, se considerará el elevado número de contrastes simultáneos. Para ello, se empleará el control de la tasa de falsos

descubrimientos (False Discovery Rate, FDR), definida como la proporción esperada de resultados falsos positivos entre todos los resultados considerados significativos (Benjamini, 2010a). En particular, se aplicará el procedimiento adaptativo en dos etapas de Benjamini–Krieger–Yekutieli (BKY; Benjamini et al. (2006)), y se comparará con el enfoque no corregido y con el método clásico de Benjamini–Hochberg (BH; Benjamini & Hochberg (1995)). El método BKY estima empíricamente el número de hipótesis nulas verdaderas y ajusta de manera adaptativa el umbral de significación, lo que permite aumentar la capacidad de detección de tendencias reales sin comprometer el control del error. Este procedimiento se considera especialmente adecuado para el análisis de tendencias a gran escala en datos espaciales en rejilla, como los utilizados en la teledetección ambiental, la climatología y la hidrología.

Finalmente, todos los procedimientos descritos se integrarán mediante dos marcos metodológicos propios desarrollados por el investigador principal: el enfoque de Análisis de Tendencias Robustas (Robust Trend Analysis, RTA; Gutiérrez-Hernández & García (2024a)) y el flujo de trabajo de Tendencias Verdaderamente Significativas (True Significant Trends, TST; Oliver Gutiérrez-Hernández & García (2025d)). Ambos esquemas combinan de forma secuencial estimadores robustos de pendiente (Theil–Sen; (Sen, 1968; Theil, 1950)), pruebas de tendencia contextuales que consideran la autocorrelación espacial y cruzada (Contextual Mann–Kendall; Neeti & Eastman (2011)), y el control adaptativo de la tasa de falsos descubrimientos (FDR; Oliver Gutiérrez-Hernández & García (2025b)). Esta integración permitirá abordar conjuntamente los principales problemas de la inferencia de datos espaciotemporales, como la presencia de valores atípicos, la autocorrelación temporal y espacial, la dependencia entre píxeles y la multiplicidad de contrastes. La aplicación previa de estos enfoques ha demostrado su capacidad para reducir sustancialmente los falsos positivos, mejorar la robustez estadística de los resultados y proporcionar una evaluación más realista de las tendencias ambientales detectadas. En conjunto, estas metodologías constituyen el marco analítico final sobre el que se apoyará la interpretación de las tendencias espaciotemporales de la vegetación en este proyecto.

Figura 22. Análisis de Tendencias Verdaderamente Significativas (TST)

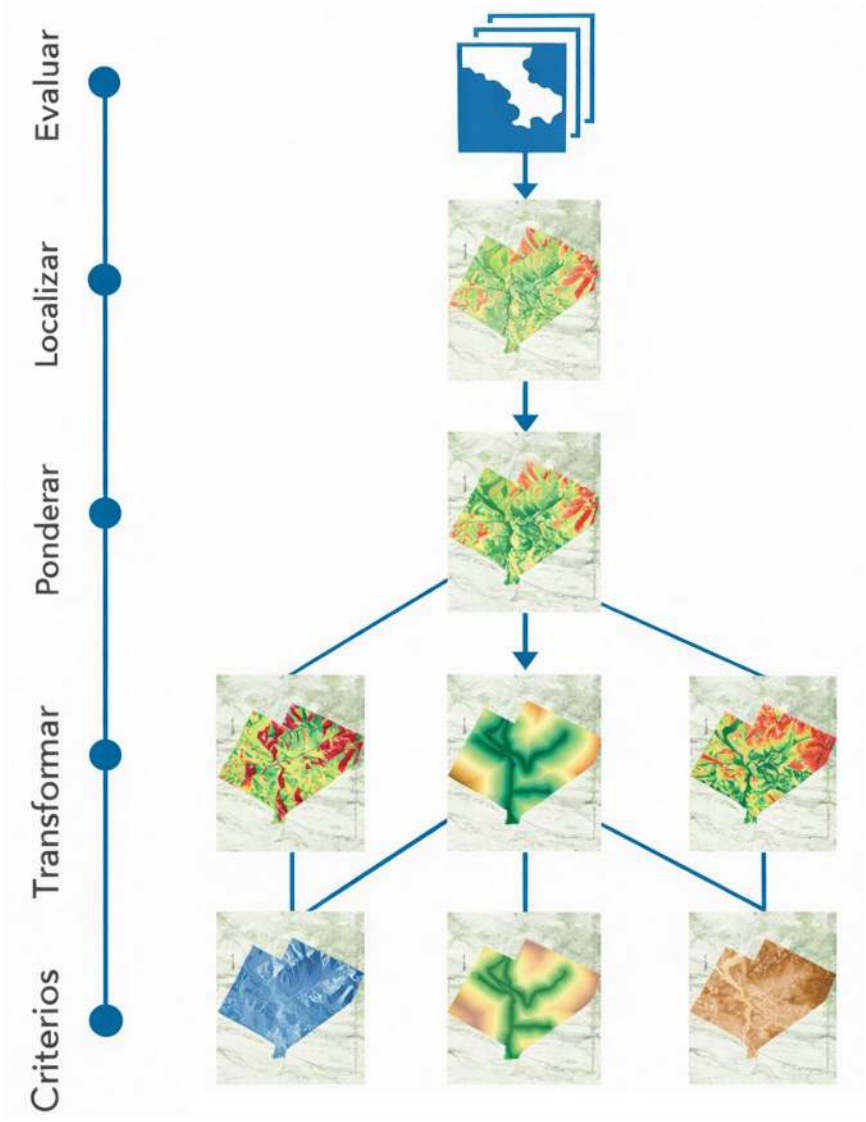


Fuente: Oliver Gutiérrez-Hernández & García (2025d).

4.6. Evaluación multicriterio de escenarios

La evaluación multicriterio ha sido uno de los pilares clásicos del análisis geográfico regional (Bosque Sendra & Moreno Jiménez, 2004; Gómez Delgado, 2005), precisamente por su capacidad para articular información ambiental, territorial, social y funcional en un marco integrado de interpretación espacial. Desde esta perspectiva, la evaluación multicriterio no se concibe únicamente como una herramienta de apoyo a la decisión, sino como un enfoque analítico propio de la geografía, con el apoyo de las TIG, especialmente adecuado para el estudio de sistemas complejos en los que convergen procesos biofísicos, dinámicas paisajísticas y usos humanos del territorio. Este enfoque se articula a partir de uno o más objetivos específicos , de los que derivan directamente los criterios, las ponderaciones y los escenarios analizados, garantizando así la coherencia entre los planteamientos teóricos, el diseño metodológico y los productos finales obtenidos (Eastman, 1999).

Figura 23. Evaluación multicriterio en un SIG



Fuente: adaptado de ESRI.

La evaluación multicriterio de escenarios constituye la última fase del marco metodológico del proyecto. En este proyecto, la evaluación multicriterio se orienta a explorar escenarios de idoneidad, vulnerabilidad, conectividad y respuesta potencial de los abetales frente a distintos contextos ambientales, climáticos y territoriales (Paegelow, 2018). Este enfoque permite combinar información procedente de los modelos de nicho ecológico, los índices derivados de la teledetección, las métricas fenológicas, las dinámicas y tendencias detectadas, etc. generando información espacialmente explícita para representar distintos escenarios de cambio ambiental (Miller et al., 2023).

Desde el punto de vista metodológico, la evaluación multicriterio se desarrollará en un entorno SIG (Eastman, 1999), lo que garantiza la coherencia espacial entre todos los criterios considerados y permite aplicar procedimientos de normalización, ponderación y agregación de forma transparente y reproducible. Cada criterio se transformará previamente en una escala común de contribución relativa (Jiang & Eastman, 2000), atendiendo a su significado ecológico, paisajístico o socioecológico y a su relación con la persistencia de las especies y la funcionalidad del sistema. Posteriormente, se aplicarán esquemas de ponderación basados tanto en la literatura científica como en el conocimiento experto (Store & Kangas, 2001).

Un componente esencial de esta evaluación será la integración de los principios de la ecología del paisaje (Gergel & Turner, 2017): incorporando métricas que describan la composición, configuración y fragmentación del paisaje, tales como el tamaño y la forma de los parches, la densidad de bordes, la conectividad estructural, el aislamiento, la heterogeneidad espacial y la complejidad del mosaico paisajístico (Eddy & Gergel, 2014; Fischer & Lindenmayer, 2007; Forman & Godron, 1981, 1986; Turner, 1989; Zeller et al., 2012). Estas métricas permitirán caracterizar cuantitativamente la estructura espacial de los abetales y de su entorno, aportando información clave sobre los procesos de fragmentación, continuidad y vulnerabilidad de los abetales bético-rifeños.

De forma complementaria, se abordará explícitamente la conectividad ecológica, entendida como la capacidad del paisaje para facilitar o limitar los flujos biológicos, la dispersión y el intercambio genético entre poblaciones (Baranyi et al., 2011; Bodin & Saura, 2010; Correa Ayram et al., 2016; Daigle et al., 2020; Galpern et al., 2011; Krosby et al., 2010; Lindborg & Eriksson, 2004; Littlefield et al., 2019; Mc Rae et al., 2008; Urban & Timothy, 2001). La conectividad se evaluará tanto desde una perspectiva estructural, basada en la disposición espacial de los parches, como desde una perspectiva funcional, considerando la idoneidad de la matriz territorial y las resistencias al movimiento derivadas de los usos del suelo, las infraestructuras y los gradientes ambientales. Estos indicadores se integrarán como criterios específicos en el análisis multicriterio, lo que permitirá identificar corredores potenciales, áreas núcleo y zonas críticas de desconexión.

La evaluación multicriterio incorporará igualmente la dimensión socioecológica del sistema (Ortega-Rubio, 2020; Ortega-Rubio et al., 2021). Los abetales bético-rifeños no constituyen espacios aislados, sino territorios habitados, gestionados y visitados, en los que existen poblaciones locales, actividades económicas tradicionales, infraestructuras, aprovechamientos forestales y ganaderos,

así como un creciente uso recreativo y turístico (Boubekraoui et al., 2024; Chergui et al., 2024; Consejería de Medio Ambiente, 2012). Estas interacciones entre la sociedad y el ecosistema influyen directamente en la estructura del paisaje, la conectividad, la presión sobre el hábitat y la viabilidad a largo plazo de las formaciones forestales. Por ello, la evaluación de escenarios integrará variables asociadas a la accesibilidad, la proximidad a núcleos habitados, infraestructuras, usos del suelo y la presión antrópica, lo que permitirá analizar explícitamente la coexistencia entre los procesos ecológicos y las dinámicas humanas (Gutiérrez Hernández, 2019; Gutiérrez-Hernández, 2018; Gutiérrez-Hernández et al., 2016; Lambin et al., 2001; Martínez-Vega et al., 2017; Mas et al., 2019). Este enfoque socioecológico facilita una interpretación más realista de los escenarios, incorporando la dimensión cultural de la conservación, evitando aproximaciones puramente biofísicas desligadas del contexto territorial en el que se insertan los abetales (Seijo et al., 2023).

La evaluación multicriterio facilitará, además, el análisis de la incertidumbre asociada a los escenarios, al permitir contrastar los resultados obtenidos bajo distintos esquemas de ponderación, combinaciones de criterios y definiciones de resistencias del paisaje. Este análisis de sensibilidad contribuirá a reforzar la robustez de las conclusiones y a evitar interpretaciones excesivamente dependientes de decisiones metodológicas particulares (Tapia et al., 2023). Para ello, se aplicarán métodos de jerarquías analíticas, como el Analytic Hierarchy Process (AHP; (Saaty, 1990, 2013)), ampliamente utilizados en evaluación territorial y paisajística, y empleados previamente por el investigador principal en su labor como consultor técnico en proyectos de evaluación de impacto paisajístico, lo que garantiza tanto la solvencia metodológica como la experiencia práctica en la aplicación de dichos procedimientos.

En el contexto específico de los abetales bético-rifeños, la evaluación multicriterio permitirá integrar la información topográfica, climática, espectral, fenológica, biogeográfica, paisajística y socioecológica en un marco común, proporcionando una visión sintética y espacialmente explícita de los escenarios actuales y potenciales de idoneidad, estabilidad, conectividad, vulnerabilidad y compatibilidad territorial. Estos resultados constituirán una base objetiva para apoyar estrategias de conservación, restauración ecológica, gestión adaptativa y planificación territorial en el ámbito de la Reserva de la Biosfera Intercontinental del Mediterráneo.

En conjunto, la evaluación multicriterio de escenarios actúa como el nivel superior de integración metodológica del proyecto, en el que convergen los distintos componentes analíticos del marco metodológico, lo que permite traducir resultados científicos complejos en productos espaciales interpretables, comparables y operativamente útiles para la investigación, la gestión ambiental y la toma de decisiones territoriales. Asimismo, estos productos constituirán un elemento central del plan de transferencia de resultados, al facilitar la comunicación de la información científica a administraciones, gestores, agentes locales y otros actores implicados, mediante cartografía sintética, indicadores territoriales y escenarios comparativos que favorecen una aplicación práctica y fundamentada del conocimiento generado.

5. Organización del trabajo

5.1. Equipo

La composición del equipo (Tabla 2) presentada en esta memoria tiene un carácter propositivo, ya que el proyecto aún no ha sido formalizado ni presentado a convocatorias de financiación concretas.

En relación con la definición del equipo de trabajo e investigación, por la naturaleza de este documento, no se incluyen nombres propios de terceros, aun cuando los perfiles académicos e institucionales de los integrantes previstos están plenamente definidos. En su lugar, se describen dichos perfiles, evitando la identificación nominal dado que las adhesiones individuales aún no han sido formalizadas. Se exceptúa al investigador principal, quien figura identificado al ser el firmante de esta memoria. No obstante, durante la defensa oral del proyecto sí se mencionarán los nombres de los investigadores y técnicos cuya participación esté prevista o confirmada, siempre conforme a los criterios éticos y formales establecidos para este tipo de presentaciones.

En consecuencia, las incorporaciones y colaboraciones indicadas constituyen un escenario de referencia realista y coherente con los objetivos del proyecto, que podrá ajustarse en función de los requisitos específicos de cada convocatoria, de la disponibilidad de los investigadores y de las condiciones de financiación finalmente establecidas.

Tabla 2. Propuesta de equipos de investigación y trabajo

Id	Categoría	Perfil	N.º	Perfil propuesto
1	Equipo de investigación	Investigador Principal	1	Oliver Gutiérrez Hernández
2	Equipo de investigación	Investigadores senior	1	Especialista en biología y ecología
3	Equipo de investigación	Investigadora internacional	1	Especialista en A. marocana
4	Equipo de investigación	Investigadores senior	1–2	Especialistas en biogeografía *
5	Equipo de investigación	Becario de investigación	1	Participación en todas las fases**
6	Equipo de trabajo	Becario de iniciación	1	Apoyo básico en recopilación
7	Equipo de trabajo	Técnico garantía juvenil	1	SIG, bases de datos, campo
8	Equipo de trabajo	Técnico de apoyo internacional	1	Enlace técnico con Marruecos
9	Colaboración institucional	UICN-Med	1	Cooperación internacional

Fuente: elaboración propia. Investigadores sénior propuestos para su incorporación al equipo de investigación o de trabajo en función de su disponibilidad, con el objetivo de desarrollar tareas concretas de alto valor especializado. ** Participación prevista en todas las fases del proyecto, con un enfoque formativo y progresivo acorde con su perfil.

De este modo, el equipo propuesto estaría conformado por los siguientes componentes:

1. El proyecto será liderado por Oliver Gutiérrez Hernández, profesor permanente laboral de la Universidad de Málaga y candidato a profesor titular de universidad, quien actuará como investigador principal. Es especialista en *Abies pinsapo* y en las metodologías propuestas, con una trayectoria que combina experiencia en los ámbitos técnico, investigador y docente, así como en el sector de la consultoría técnica ambiental. Cuenta con un manejo avanzado de

sistemas de información geográfica y técnicas de modelización espacial y biogeográfica, aplicados al análisis de patrones de distribución, a la dinámica forestal y a la conservación de especies, lo que le permite integrar enfoques científicos rigurosos con las necesidades operativas propias de la gestión ambiental. Su perfil integra una sólida base metodológica con una clara orientación aplicada, habiendo participado en proyectos de investigación, trabajos técnicos y actividades de transferencia, lo que le proporciona una visión equilibrada entre la generación de conocimiento científico, la gestión de datos espaciales y la aplicación en contextos reales de conservación. Asumirá la coordinación científica, metodológica y administrativa del proyecto, garantizando la coherencia entre objetivos, métodos, cronograma y resultados, así como la correcta integración del trabajo de los equipos investigador y técnico.

2. Un doctor en biología y científico titular del Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología (IRNAS) del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), experto en ecología y métodos estadísticos, con amplia experiencia en biología de la conservación y en la dirección de tesis doctorales. Su perfil refuerza la solidez metodológica del proyecto y, en determinadas convocatorias, podrá actuar como (Co)Investigador Principal, configurando una dupla coordinadora altamente complementaria que fortalece la experiencia global del equipo y su valoración en los procesos de evaluación.

3. Una doctora en biología y profesora de la Universidad Abdelmalek Essaâdi (Tetuán). Es una de las principales especialistas en *Abies marocana* y en ecología de la conservación. Su incorporación aporta una perspectiva comparativa y transfronteriza de gran valor para los objetivos del proyecto, reforzando, además, su dimensión internacional mediante la colaboración con un equipo científico marroquí.

4. En función de la disponibilidad y de las necesidades específicas de cada fase, se propondrá la colaboración de hasta dos especialistas en biogeografía, doctores en geografía con rango de catedrático y trayectoria consolidada en biogeografía, bioclimatología y gestión de espacios naturales protegidos, procedentes de las universidades de Granada y Sevilla. Su incorporación se prevé preferentemente como miembros del equipo de investigación; no obstante, si las condiciones de disponibilidad no lo permitieran, se integrarían en el equipo de trabajo para la realización de tareas concretas de alto valor especializado.

5. Una becaria de investigación, con formación académica en geografía y un máster en esta misma área, que participará activamente en el desarrollo analítico y metodológico del proyecto. Se prevé orientar su especialización hacia la biogeografía, la gestión de espacios naturales protegidos en áreas transfronterizas y, en particular, el estudio de *Abies pinsapo*, en consonancia con las líneas de trabajo prioritarias del proyecto.

El proyecto propondrá además la incorporación de:

6. Una becaria de iniciación, actualmente estudiante del Grado en Geografía y con la previsión de cursar el Máster Universitario en Diversidad Biológica y Medio Ambiente de la Universidad de Málaga, destinada a apoyar tareas básicas de recopilación y organización de la información. Si la evolución académica y del proyecto lo permiten, se prevé que pueda desarrollar en este ámbito su Trabajo Fin de Grado, posteriormente su Trabajo Fin de Máster y, eventualmente, postularse a una beca de investigación. Asimismo, se prevé su estrecha colaboración con la becaria de investigación, especialmente en tareas de apoyo metodológico, de organización de datos y de aprendizaje progresivo en biogeografía.

7. Un técnico contratado en el marco del programa de Garantía Juvenil, orientado al apoyo en SIG, a la gestión de bases de datos y a tareas de trabajo de campo. En este caso, no es posible definir un perfil individual más concreto, más allá de especificar la titulación requerida, preferentemente Geografía o Ciencias Ambientales, dado que el proceso de selección no depende de los convocantes, sino que se realiza conforme a los criterios de elegibilidad y a los procedimientos específicos establecidos para este tipo de contratación. Adicionalmente, no se descarta solicitar un «Técnico de Apoyo a la Investigación» del «Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica», siempre que las circunstancias de la convocatoria lo permitan, con el fin de reforzar las tareas técnicas vinculadas al proyecto.

8. Además, se contará con la participación de un técnico internacional, doctor en biología, quien actuará como enlace técnico en el norte de Marruecos. Realizó su tesis doctoral en el IRNAS–CSIC y actualmente trabaja en la Universidad Abdelmalek Essaâdi (Tetuán). Su función principal será establecer y facilitar la coordinación científico-técnica con las autoridades responsables de la gestión de los bosques y de los espacios naturales protegidos en el Rif, contribuyendo a la interlocución institucional y a la planificación de actividades conjuntas en terreno. Asimismo, asesorará y participará activamente en trabajos de campo y en la realización de inventarios, aportando su experiencia en ecología y gestión de ecosistemas mediterráneos.

9. Finalmente, el proyecto propondrá la colaboración institucional con el Centro de Cooperación del Mediterráneo de la UICN (UICN-Med), con el objetivo de reforzar la proyección internacional, la transferencia de resultados y la conexión con iniciativas de conservación a escala mediterránea.

5.2. Actividades

La planificación se organiza por actividades (no por objetivos), lo que permite solapamientos estratégicos, retroalimentación entre resultados y ajustes iterativos conforme se consolida el desarrollo del proyecto. Las actividades del plan de trabajo se estructuran como un conjunto de bloques operativos interrelacionados, cada uno de los cuales implica un conjunto articulado de tareas, diseñados para garantizar la coherencia metodológica, la trazabilidad entre objetivos y resultados, y una integración progresiva de productos espacialmente explícitos.

5.2.1. Diseño de la arquitectura del SIG

- Objetivos vinculados: OE1 (transversal a OE2–OE5).
- Contenido: Definición operativa del ámbito de estudio (unidades territoriales y zonificación núcleo–amortiguamiento–transición en la Reserva), establecimiento del sistema de referencia espacial común, resoluciones objetivo y criterios de armonización; diseño e implementación de la estructura del repositorio SIG (geodatabase) y del sistema de metadatos, incluyendo convenciones de nomenclatura, control de versiones, trazabilidad y reglas de interoperabilidad. Se incorporará, además, la definición de modelos de geoprocesamiento reproducibles y la preparación de salidas estandarizadas para consulta y transferencia (formatos y servicios/paquetes según proceda).
- Productos: SIG/Geodatabase inicial operativo, con estructura normalizada de capas, dominios, relaciones y metadatos conforme a estándares OGC/INSPIRE; documento de especificaciones técnicas y diccionario de datos que describen de forma exhaustiva la semántica, formato, unidades, sistemas de referencia, calidad y procedencia de cada variable; máscara espacial de trabajo por unidades homogéneas, validada topológica y temáticamente; *toolbox* y flujos de trabajo reproducibles para operaciones recurrentes de preprocesado, análisis y validación, implementados mediante Model Builder en ArcGIS, TerrSet y QGIS, junto con *scripts* específicos en R para la automatización de procesos, el análisis estadístico-espacial y el control de calidad; y paquete de datos inicial listo para análisis, intercambio y transferencia, acompañado de metadatos completos, control de versiones y documentación para su reutilización por terceros.
- Participantes: Oliver Gutiérrez Hernández (1), becaria de investigación (5), técnico de garantía juvenil (7), con apoyo puntual de un técnico de apoyo internacional (8).

5.2.2. Captura, integración y homogeneización de datos georreferenciados

- Objetivos vinculados: OE1, soporte a OE2–OE5.
- Contenido: Recolección, depuración y armonización de capas topográficas, climáticas, edáficas/geomorfológicas, de uso del suelo, de infraestructuras y de variables antrópicas, procedentes de fuentes oficiales, científicas y de campañas de trabajo de campo, integradas en un esquema de datos común. Entre las fuentes principales se incluyen WorldClim y CHELSA para variables climáticas, el Modelo Digital del Terreno de la NASA (SRTM/ASTER),

misiones LiDAR, productos de cobertura y uso del suelo derivados de Sentinel, así como cartografía temática oficial. Se realizarán la armonización de escalas, proyecciones y resoluciones; el control de calidad espacial (topología, vacíos, valores extremos); la preparación diferenciada de capas categóricas y continuas; y la generación de gradientes y capas derivadas. La integración será sistemática en el SIG conforme a los criterios definidos en A1.

- Productos: Catálogo de variables armonizadas; capas de ráster/vector validadas; informe de control de calidad y de coherencia espacial; repositorio SIG actualizado.
- Participantes: Oliver Gutiérrez Hernández (1), becaria de investigación (5), técnico de garantía juvenil (7), becaria de iniciación (6), con supervisión metodológica del especialista en biología y ecología (2).

5.2.3. Trabajos de campo

- Objetivos vinculados: OE1, OE2, OE5 (y validación transversal).
- Contenido: Realización de al menos dos campañas de trabajo de campo en el área de estudio, distribuidas en el año 1 y el año 2 del proyecto, orientadas a: Contraste de verdad terreno (*ground truth*) de las principales capas ambientales, de uso del suelo y de estructura forestal; elaboración de inventarios básicos de estructura, estado sanitario y regeneración del hábitat en puntos o parcelas representativas; registro sistemático mediante reportaje fotográfico georreferenciado; identificación y documentación de presiones antrópicas, infraestructuras, accesos y usos del territorio; recogida de información cualitativa mediante entrevistas técnicas semiestructuradas con gestores, técnicos y agentes locales; validación ecológica y paisajística de los patrones detectados en los análisis espaciales.

  La información obtenida se integrará en el SIG como capas auxiliares, bases de datos asociadas y material interpretativo, y servirá como soporte para la validación de la modelización biogeográfica, los análisis de paisaje, la evaluación de conectividad y la interpretación socioecológica de los escenarios.

- Productos: Informes de campo; inventarios georreferenciados; archivo fotográfico sistemático; síntesis de entrevistas técnicas; capas de validación territorial; documentación integrada en el SIG.
- Participantes: Oliver Gutiérrez Hernández (1), becaria de investigación (5), técnico de garantía juvenil (7), becaria de iniciación (6), técnico de apoyo internacional (8) y colaboración de la especialista en *A. marocana* (3) en las campañas en el ámbito marroquí.

5.2.4. Preparación y preprocesado de distribuciones y registros de presencia

- Objetivos vinculados: OE2 (y soporte a OE5).
- Contenido: Consolidación de registros de presencia de A. pinsapo y A. marocana orientada al análisis de distribuciones, incluyendo tanto la distribución actual como evidencias

documentadas de distribuciones pasadas procedentes de fuentes históricas, bibliográficas y cartográficas; depuración sistemática (coordenadas, duplicados y sesgos de muestreo); rarefacción y filtrado espacial; definición del área accesible (M) y del marco biogeográfico comparativo; generación de pseudoausencias y estrategias de muestreo de fondo para la modelización; e integración de datos de campo para el refinamiento de la cartografía actual y la incorporación de información sobre densidad, diversidad y caracterización in situ de las masas. Se busca simultáneamente la máxima exactitud y precisión en la delimitación de las distribuciones, garantizando que la representación espacial refleje exhaustivamente la distribución observada y conocida, minimizando tanto las omisiones como las incorrecciones cartográficas, así como la máxima sistematicidad en los esquemas de muestreo, con el fin de reducir los sesgos en los modelos.

- Productos: Conjuntos de datos de presencias validado, documentado y reproducible, con control explícito de calidad, trazabilidad de fuentes y versiones; capas de accesibilidad (M) y delimitación biogeográfica asociada; informe técnico de sesgos, criterios de depuración, rarefacción y decisiones de filtrado; estructura de datos preparada específicamente para su uso en análisis de distribución y modelización; y conjunto de datos armonizado conforme a los requerimientos de la UICN (IUCN) y GBIF, para evaluaciones de estado de conservación, incluyendo soporte para la generación de mapas de distribución, extensión de presencia (EOO), área de ocupación (AOO) y documentación técnica asociada.
- Participantes: Oliver Gutiérrez Hernández (1), becaria de investigación (5), especialista en biología y ecología (2), y la especialista en *A. marocana* (3) para la validación de registros de *A. marocana*.

5.2.5. Modelización y análisis de conexiones biogeográficas

- Objetivos vinculados: OE2, OE5.
- Contenido: Calibración de modelos de distribución e idoneidad para ambas especies bajo un conjunto armonizado de variables; evaluación interna y externa; análisis comparativo del nicho (solapamiento, divergencia); identificación de áreas de coherencia biogeográfica y de posibles conexiones; proyección de los modelos a distintos escenarios de cambio climático y rutas de emisión para evaluar la sensibilidad y la estabilidad espacial de las predicciones bajo condiciones futuras; y cartografía interpretativa de los resultados.

  En la modelización biogeográfica (A4), el control del error se aborda mediante procedimientos de validación cruzada, evaluación independiente, análisis de la estabilidad de los modelos y comparación entre algoritmos, con especial atención a la sobreparametrización, al sesgo por muestreo y a la transferencia espacial de los modelos. El objetivo es garantizar la robustez predictiva y la coherencia ecológica de los resultados, más que la significación estadística puntual de cada predicción.
- Productos: Mapas de idoneidad actuales y proyectados bajo distintos escenarios de cambio climático y rutas de emisión; métricas de desempeño, estabilidad y robustez de los modelos; síntesis comparativa del nicho ecológico (solapamiento, divergencia y desplazamientos);

cartografía de conectividad potencial y áreas de coherencia biogeográfica; y documentación técnica asociada para su interpretación, reproducibilidad y uso en contextos científicos y de gestión.

- Participantes: Oliver Gutiérrez Hernández (1), especialista en biología y ecología (2), becaria de investigación (5), con apoyo puntual de investigadores sénior colaboradores según disponibilidad (4).

5.2.6. Construcción de series temporales y productos espectrales multiescalares

- Objetivos vinculados: OE3 (soporte a OE4 y OE5).
- Contenido: A partir de las distribuciones consolidadas y de los datos de campo generados en A3 y A4, descarga y armonización de series temporales (MODIS, Sentinel y Landsat, según proceda); extracción de series por píxel y por unidades espaciales definidas (parches y masas); construcción de productos NDVI y EVI; filtrado, regularización y control de calidad temporal; y derivación de métricas fenológicas espacialmente explícitas.
- Productos: Cubos temporales multiescalares y series temporales limpias que constituyen una base operativa para la monitorización continua; métricas fenológicas espacialmente explícitas para el seguimiento de cambios interanuales y estacionales; e informe técnico sobre la sensibilidad a la resolución espacial y temporal, y al sensor, como soporte para la interpretación y la actualización periódica de los análisis.
- Participantes: Oliver Gutiérrez Hernández (1), becaria de investigación (5), técnico de garantía juvenil, con supervisión metodológica del especialista en biología y ecología (2).

5.2.7. Análisis de tendencias estacionales e interanuales y detección de rupturas

- Objetivos vinculados: OE4.
- Contenido: Modelización de la estacionalidad y de la variabilidad interanual basada en anomalías; pruebas de tendencia robustas (Mann–Kendall, Theil–Sen, STA, RTA, TST) aplicadas a series por píxel; identificación de cambios en la amplitud, la fase y la duración de la estación; análisis de rupturas, extremos y episodios de estrés, cuando sea aplicable.
  En el análisis de tendencias estacionales e interanuales (A6), el control del error se centra en la inferencia estadística espaciotemporal, incorporando procedimientos de corrección mediante pruebas múltiples, con control de la tasa de falsos descubrimientos (FDR), así como el tratamiento explícito de la autocorrelación temporal y espacial. En este caso, el objetivo es discriminar entre señales ambientales reales y patrones espurios derivados de la multiplicidad de contrastes y de la dependencia entre píxeles
- Productos: Mapas espaciales de anomalías interanuales, tendencias, magnitud del cambio y significación estadística; cartografía de incertidumbre y error asociado a las estimaciones; modelos ajustados de curvas estacionales por píxel y por unidades espaciales; parámetros derivados de dichas curvas (amplitud, fase, duración, pendiente, área bajo la curva, entre

otros); series temporales modelizadas y observadas para comparación; e informes técnicos de validación, sensibilidad y estabilidad de los resultados.

- Participantes: Oliver Gutiérrez Hernández (1), especialista en biología y ecología (2), becaria de investigación (5).

5.2.8. Análisis del paisaje forestal y conectividad ecológica

- Objetivos vinculados: OE2, OE5.
- Contenido: A partir de las distribuciones consolidadas, la cartografía ambiental integrada y los productos espectrales previos, delimitación de parches, matrices y elementos lineales del paisaje; cálculo de métricas de composición y configuración (tamaño, forma, bordes, aislamiento, conectividad, complejidad y heterogeneidad); evaluación de conectividad estructural y funcional mediante grafos, distancias y flujos potenciales; construcción de superficies de resistencia basadas en usos del suelo, infraestructuras, gradientes topográficos y variables ambientales; e identificación y evaluación de corredores ecológicos, áreas núcleo, cuellos de botella y zonas de conflicto.
- Productos: Atlas comparativo de métricas del paisaje para distintos momentos temporales (pasado y presente); mapas de conectividad estructural y funcional y de zonas críticas para la conectividad en escenarios históricos y actuales; cartografía de corredores, áreas núcleo y cuellos de botella; indicadores espaciales y sintéticos para la gestión adaptativa, la restauración y la planificación territorial; y documentación técnica asociada que permita la interpretación, comparación temporal y actualización futura de los resultados.
- Participantes: Oliver Gutiérrez Hernández (1), becaria de investigación (5), investigadores sénior colaboradores (4) para tareas específicas de análisis de paisaje y biogeografía.

5.2.9. Evaluación multicriterio de escenarios

- Objetivos vinculados: OE5 (y transferencia).
- Contenido: Definición de criterios espaciales derivados directamente de los resultados de las actividades previas, incluyendo la idoneidad ambiental actual y futura, las tendencias y rupturas fenológicas, la vulnerabilidad climática, la conectividad ecológica, la presión antrópica, la accesibilidad y los usos del territorio. Los criterios se normalizarán y ponderarán mediante métodos de jerarquía analítica (AHP), complementados con conocimiento experto y análisis exploratorios de correlación y redundancia.

  Se generarán escenarios espaciales comparables que integren información biofísica, biogeográfica, espectral y socioecológica, incorporando explícitamente las superficies de resistencia del paisaje y los gradientes de presión humana. La dimensión socioecológica se abordará mediante variables de población, infraestructura, recreación, actividades productivas y cambios en el uso del suelo, lo que permitirá una interpretación conjunta de los escenarios desde una perspectiva territorial y de gestión.

  Se realizará un análisis sistemático de sensibilidad a las ponderaciones, a la selección de criterios y a las resistencias del paisaje, con el fin de evaluar la robustez, la estabilidad

espacial y la incertidumbre de los resultados. Finalmente, los escenarios y productos derivados serán contrastados técnicamente con administraciones, gestores y actores locales, cuando proceda, para validar, ajustar y orientar los resultados hacia su aplicabilidad en la gestión adaptativa.

- Productos: Mapas multicriterio por escenario y por horizonte temporal; evaluación espacial de robustez mediante análisis de sensibilidad e incertidumbre; indicadores socioecológicos integrados y normalizados; síntesis cartográfica y analítica de prioridades, conflictos y evaluación multicriterio entre conservación, conectividad, presión antrópica y usos del territorio; identificación de zonas de compatibilidad y de conflicto entre objetivos; versión operativa de los escenarios para su aplicación en gestión adaptativa y planificación territorial; y actas, informes técnicos y documentos de validación con administraciones, gestores y actores territoriales.
- Participantes: Oliver Gutiérrez Hernández (1), becario de investigación (5), especialista en biología y ecología (2), con apoyo puntual de investigadores sénior colaboradores (4) y contraste técnico con UICN-Med (9).

5.2.10. Transferencia, difusión y productos operativos

- Objetivos vinculados: transversales (especialmente OE1 y OE5).
- Contenido: Integración y síntesis de los resultados generados en A1–A9 en productos cartográficos y analíticos operativos; preparación de atlas temáticos, visores y capas descargables normalizadas, así como de servicios interoperables (WMS/WFS/descarga). Elaboración de guías técnicas y metodológicas para gestores, que incluyen criterios de interpretación, limitaciones y recomendaciones de uso. Documentación completa del SIG, de las *geodatabases* y de los flujos de trabajo reproducibles (Model Builder en ArcGIS, TerrSet y QGIS, y scripts en R), garantizando trazabilidad, transparencia y replicabilidad.

  Para la difusión y operativización de resultados, se utilizará el entorno de ArcGIS Online como plataforma de publicación y comunicación, produciendo Instant Apps, StoryMaps y Dashboards orientados a la visualización interactiva de indicadores, escenarios y zonas críticas, así como a su consulta mediante perfiles técnicos y no técnicos. Además, se desarrollarán materiales de comunicación científica, divulgativa y educativa (según el público objetivo), con visualizaciones interpretativas y resúmenes ejecutivos. Asimismo, se definirá una estrategia de transferencia activa mediante talleres técnicos, sesiones con gestores y contraste de productos con administraciones y actores territoriales, cuando proceda.

  De forma complementaria, se procurará la organización de un congreso, simposio o coloquio científico-técnico específico sobre los resultados del proyecto y su contexto metodológico y aplicado, concebido como un espacio de intercambio entre investigadores, gestores y responsables institucionales, que favorezca la discusión crítica, la transferencia de conocimiento y la proyección externa del proyecto. Finalmente, se establecerá una estrategia de actualización, mantenimiento y escalabilidad de los productos, que incluya

protocolos para incorporar nuevos datos, actualizar modelos y preservar la coherencia metodológica del sistema.

- Productos: Paquete integral de transferencia que incluye cartografía temática, indicadores espaciales, escenarios, métricas y documentación técnica completa; visores web y entregables interoperables (servicios WMS/WFS, capas descargables y aplicaciones en ArcGIS Online mediante Instant Apps, StoryMaps y Dashboards) listos para su integración en sistemas institucionales; guías metodológicas y manuales de uso para gestores y técnicos; materiales de divulgación científica, educativa y social; actas y memorias de los talleres, sesiones técnicas y del congreso, simposio o coloquio organizado en el marco del proyecto; repositorio documentado de datos y flujos de trabajo reproducibles; y estrategia formal de actualización, mantenimiento, gobernanza y escalabilidad de los productos, incluyendo protocolos de revisión, versionado y preservación a largo plazo.
- Participantes: Oliver Gutiérrez Hernández (1), becaria de investigación (5) y técnico de garantía juvenil (7), UICN-Med (9), con la participación del equipo investigador completo en acciones de validación, talleres y difusión científica.

5.3. Cronograma

El cronograma combina actividades sucesivas, progresivas y simultáneas, lo que permite revisar y ajustar el trabajo a partir de resultados intermedios (Tabla 3). La intensidad relativa de cada actividad se ha representado mediante un sistema de tres niveles que refleja el peso operativo, analítico y productivo de cada bloque en los distintos trimestres.

Tabla 3. Cronograma de actividades del proyecto

Actividad	Año 1					Año 2			Año 3			
	1ºT	2ºT	3ºT	4ºT	1ºT	2ºT	3ºT	4ºT	1ºT	2ºT	3ºT	4ºT
A1. Arquitectura SIG	●●●	●●	●	●								
A2. Integración de datos	●●	●●	●●●	●●	●●	●●	●●	●●	●	●	●	●
A3. Trabajos de campo		●●	●●●	●●		●●	●●●	●●				
A4. Distribuciones		●●	●●●	●●	●							
A5. Modelización biogeográfica			●	●●	●●●	●●	●					
A6. Series temporales					●●●	●●	●●					
A7. Tendencias y rupturas						●●	●●	●				
A8. Análisis del paisaje					●	●●	●●●	●●	●			
A9. Escenarios multicriterio						●	●●	●●●	●●	●		
A10. Difusión y transferencia	●	●●	●●●	●	●	●●	●●	●●	●●●	●●●	●●●	●●

Fuente: elaboración propia. Nota: Las combinaciones alfanuméricas A1–A10 identifican las actividades del proyecto. Los puntos negros indican su ejecución trimestral. El número de puntos representa la intensidad del trabajo: baja (●), media (●●) y alta (●●●). Los trimestres se identifican como 1ºT, 2ºT, 3ºT y 4ºT, cada uno de los cuales está integrado en una de las tres anualidades del proyecto.

Durante el primer año, el esfuerzo se concentra en la construcción de la base estructural y empírica del proyecto. La actividad A1 (Arquitectura SIG) alcanza su máxima intensidad en el primer trimestre, asegurando el establecimiento temprano de un marco técnico sólido que actúa como soporte transversal para el resto de las actividades. De forma paralela, A2 (Integración de datos) se desarrolla de manera intensiva y continua, reflejando el carácter dinámico y progresivo del repositorio SIG. Las actividades A3 (Trabajos de campo) y A4 (Distribuciones) se solapan estratégicamente en los trimestres centrales del primer año, lo que permite una retroalimentación directa entre la validación en terreno y la depuración de los registros de presencia, lo que refuerza la calidad de las distribuciones obtenidas.

La actividad A5 (Modelización biogeográfica) se inicia una vez consolidadas las distribuciones, alcanzando su máxima intensidad al comienzo del segundo año, cuando ya se dispone de un conjunto de datos lo suficientemente completo. En paralelo, la construcción de series temporales (A6) se activa en el último trimestre del primer año y se desarrolla de forma intensiva durante el segundo, lo que proporciona la base para los análisis dinámicos. Sobre estas series se articula A7 (tendencias y rupturas), cuya secuencia temporal refleja claramente su dependencia metodológica de A6.

El análisis del paisaje y la conectividad (A8) se sitúa en el núcleo del segundo año, una vez disponibles los resultados de distribución, dinámica y modelización, alcanzando su máxima intensidad cuando confluyen los principales productos analíticos del proyecto. A partir de estos resultados integrados se desarrolla A9 (Evaluación multicriterio de escenarios), concebida como una actividad de síntesis progresiva, con un incremento escalonado de intensidad que culmina en el primer semestre del tercer año.

La actividad A10 (Difusión y transferencia) se desarrolla de manera continuada durante los tres años del proyecto, con una intensidad adaptada al ritmo de producción científica y a la necesidad de generar resultados transferibles desde fases tempranas.

Su inicio en el Año 1, con un incremento progresivo de la carga hasta alcanzar un nivel alto en el 3T, responde a la estrategia de activar desde el comienzo acciones de transferencia inicial y de producción de resultados publicables. Esta planificación temprana permite establecer canales de comunicación, generar materiales preliminares y, sobre todo, impulsar las primeras publicaciones científicas, que actúan como un incentivo directo para las personas participantes y favorecen su implicación sostenida en el proyecto. Durante el Año 2, la actividad mantiene una presencia continua, con intensidades bajas y medianas en todos los trimestres, lo que facilita el acompañamiento del desarrollo metodológico y analítico del proyecto mediante procesos de difusión temprana, validación progresiva de productos y una interacción regular con gestores y actores territoriales. Esta estabilidad asegura que el flujo de conocimiento generado no quede aislado, sino que avance en paralelo a la producción científica. El Año 3 concentra la mayor carga de trabajo, con picos de alta intensidad en los tres primeros trimestres, momento en el que se entregan los entregables finales, se organiza un encuentro científico-técnico específico y se completa la fase de transferencia efectiva a instituciones y actores del territorio. La producción

científica se intensifica en paralelo, consolidando artículos, comunicaciones y materiales derivados directamente de los resultados finales.

La continuidad de A10 a lo largo de los tres años es esencial no solo para garantizar resultados directamente transferibles, sino también para sostener una estrategia de publicaciones científicas desde el primer año, que fortalece la visibilidad del proyecto y funciona como mecanismo de motivación y reconocimiento profesional para las personas implicadas.

En conjunto, el cronograma refleja un equilibrio entre secuencialidad y solapamiento, evitando compartimentos estancos entre actividades y favoreciendo la integración progresiva de los resultados. Esta estructura temporal permite minimizar riesgos metodológicos, optimizar el uso de recursos y maximizar la coherencia interna del proyecto, asegurando que cada bloque operativo se apoya en productos previamente consolidados y, a su vez, alimenta las actividades posteriores

5.4. Infraestructura

El proyecto se apoya en la infraestructura científica y técnica disponible en la Universidad de Málaga y en las instituciones colaboradoras, la cual resulta suficiente para garantizar el desarrollo completo de las actividades propuestas sin necesidad de inversiones estructurales adicionales.

El Investigador Principal y buena parte del equipo cuentan con equipos informáticos de alto rendimiento para análisis espacial, modelización y tratamiento de series temporales, así como con acceso a licencias institucionales de ArcGIS Pro y ArcGIS Online, junto con software libre y especializado (QGIS, TerrSet y R), lo que permite la implementación de flujos de trabajo reproducibles, el control de calidad y la generación de productos interoperables. Asimismo, se cuenta con apoyo logístico, servicios de investigación y soporte administrativo a través de las secretarías y las unidades técnicas de la Universidad de Málaga.

El equipo contará, además, con acceso a repositorios climáticos, espectrales y topográficos de uso científico habitual (WorldClim, CHELSA, MODIS, Sentinel, Landsat, SRTM, ASTER, LiDAR y cartografía temática oficial), así como a bases de datos de biodiversidad y conservación (GBIF, IUCN y literatura científica especializada). Para el trabajo de campo se dispone de equipamiento GPS, dispositivos móviles para el registro georreferenciado, material fotográfico digital y logística básica mediante recursos institucionales o concertados.

Asimismo, el Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología del CSIC (IRNAS-CSIC) pone a disposición del proyecto sus laboratorios y recursos técnicos, que podrán utilizarse para el apoyo metodológico, el análisis complementario, la validación de resultados y el trabajo colaborativo, reforzando la capacidad analítica y la solidez científica del proyecto. La colaboración con la Universidad de Tetuán y con el Centro de Cooperación del Mediterráneo de la UICN (UICN-Med) amplía, además, la infraestructura institucional disponible, proporcionando acceso a redes científicas, plataformas de transferencia y apoyo para la difusión y validación de resultados.

De forma complementaria, el proyecto contará con la colaboración de diversas entidades institucionales que refuercen su viabilidad operativa y el acceso a información clave. La Consejería

de Medio Ambiente, a través de la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM), contribuirá mediante el suministro de datos ambientales y territoriales de referencia para su integración en el SIG del proyecto. El Parque Nacional de la Sierra de las Nieves y el Parque Nacional de Talassemtane (Alto Comisionado de Agua y. Bosques y Lucha contra la Desertificación de Marruecos) aportarán el marco institucional necesario para la realización de trabajos de campo, facilitando los permisos y autorizaciones, así como el contacto con los servicios técnicos de gestión. Asimismo, el Instituto Geográfico Nacional proporcionará acceso a cartografía base y productos geográficos oficiales, garantizando la coherencia y la calidad de la información espacial utilizada.

En conjunto, la infraestructura disponible garantiza la viabilidad técnica del proyecto, la correcta gestión, preservación y transferencia de los datos, así como la generación de productos científicos y operativos plenamente alineados con los objetivos planteados

5.5. Contratación de servicios externos

Para la ejecución de las campañas de campo planificadas en el Parque Nacional de Talassemtane (Marruecos) se prevé la contratación de servicios externos especializados que faciliten la organización logística integral de los desplazamientos, la estancia y el apoyo sobre el terreno.

En este contexto, se contratarán los servicios de RF Natura (Ronda), empresa con amplia experiencia en actividades en espacios naturales protegidos y en el diseño, la coordinación y la ejecución de programas de campo en entornos transfronterizos, incluido el propio Parque Nacional de Talassemtane. RF Natura se encargará de la gestión completa de los viajes, incluyendo asesoramiento técnico, coordinación de permisos, planificación de rutas, transporte local, alojamiento, apoyo logístico, interpretación del medio y gestión de contingencias, garantizando así el correcto desarrollo de las actividades de campo en este ámbito. Asimismo, la empresa garantizará la contratación de personal local para el desarrollo de estas actividades, contribuyendo a la integración territorial del proyecto, al conocimiento operativo del entorno y al impacto socioeconómico positivo en el área de estudio. De forma complementaria, RF Natura aportará apoyo técnico para la elaboración de material fotográfico y videográfico, orientado tanto a la documentación científica del trabajo de campo como a la difusión y transferencia de los resultados del proyecto.

Esta contratación externa permitirá optimizar recursos, asegurar la seguridad operativa de los participantes y garantizar la compatibilidad de las actividades con las normativas y las instituciones gestoras del territorio.

El proyecto también prevé la contratación de los servicios de Editorial La Serranía, empresa gaditana fundada en 2003 y con una amplia trayectoria reconocida en la edición de guías y monografías sobre espacios naturales, senderismo y patrimonio ambiental de Andalucía. Esta entidad será responsable de la producción de una monografía científica-divulgativa dedicada a la Reserva de la Biosfera y a los abetales objeto de estudio, concebida como producto de transferencia, divulgación y puesta en valor del conocimiento generado por el proyecto.

Editorial La Serranía cuenta con una amplia experiencia editorial en espacios naturales andaluces, con numerosas publicaciones de referencia sobre Sierra de las Nieves, Sierra de Grazalema, Los Alcornocales, Sierra Nevada y otros territorios de alto valor ambiental, así como con un reconocido prestigio avalado por múltiples galardones otorgados por instituciones científicas, culturales y del ámbito del montañismo y el turismo de naturaleza. Su línea editorial incluye colecciones especializadas en medio ambiente, botánica, micología, ornitología, literatura de viajes y patrimonio natural, lo que garantiza un tratamiento riguroso, accesible y de alta calidad del contenido. La contratación de esta editorial permitirá transformar los resultados del proyecto en un producto editorial de alto valor científico, divulgativo y territorial, facilitando su difusión entre gestores, técnicos, la comunidad científica y el público en general. Asimismo, esta decisión refuerza la apuesta del proyecto por el tejido empresarial y cultural local, contribuyendo a la transferencia de conocimiento al entorno socioeconómico de la Serranía de Ronda y de Andalucía en su conjunto.

El proyecto prevé igualmente la publicación de una monografía científica de alcance internacional en la editorial Springer, dentro de su reconocida colección «Geography». Springer garantiza procesos editoriales rigurosos, revisión por pares y una amplia difusión en formato impreso y digital, con presencia en las principales bases de datos y plataformas académicas internacionales. La publicación en esta serie permitirá situar los resultados del proyecto en circuitos internacionales de investigación en geografía física, biogeografía, modelización ambiental y planificación territorial, asegurando su accesibilidad para comunidades científicas, instituciones gestoras y profesionales especializados.

Además, se negociará específicamente la modalidad de publicación, evaluando la posibilidad de editar el volumen en acceso abierto mediante pago (*open access*) o bien optar por una publicación vinculada al sistema de suscripción tradicional de Springer, decisión que se adoptará en función del presupuesto disponible y de la estrategia de visibilidad internacional del proyecto. La edición en inglés y su integración en una serie de prestigio reforzarán el impacto académico, incrementarán la difusión y favorecerán la conexión con redes y grupos de investigación internacionales. Esta decisión editorial complementa la dimensión territorial y divulgativa del volumen elaborado con Editorial La Serranía, articulando un doble canal de transferencia —local y global— que maximiza el alcance y la utilidad del conocimiento generado.

5.6. Compra de material y equipamiento

El proyecto requiere la adquisición de un conjunto de material y equipamiento directamente vinculado a la ejecución simultánea de las actividades analíticas, de campo y de transferencia, y a la estructura operativa del equipo investigador y técnico prevista.

Aunque la Universidad de Málaga proporciona infraestructura básica, la carga de trabajo paralela derivada del cronograma y la necesidad de mantener flujos reproducibles, trazables y continuos hacen imprescindible dotar al personal en formación y al técnico de medios propios, evitando cuellos de botella por la disponibilidad de recursos y garantizando la continuidad operativa del proyecto en todas sus fases.

Con el fin de reflejar con claridad las necesidades del proyecto, el equipamiento se estructura en dos bloques diferenciados: material prioritario, imprescindible para garantizar la operatividad básica y continua del equipo, y material complementario de apoyo científico-técnico, orientado a reforzar la calidad de las validaciones de campo y de la interpretación ecofisiológica de los resultados. Esta diferenciación permite justificar de forma transparente qué adquisiciones resultan esenciales para el funcionamiento del proyecto y cuáles aportan un valor añadido metodológico, manteniendo una planificación de recursos proporcionada y plenamente alineada con las actividades A1–A10.

5.6.1. Equipamiento imprescindible

En primer lugar, se prevé la adquisición de cuatro ordenadores portátiles de alta prestación, destinados al Investigador Principal, a la becaria de investigación, a la becaria de iniciación y al técnico de Garantía Juvenil.

Estos equipos resultan esenciales para el desarrollo de todas las tareas analíticas del proyecto, incluyendo el diseño y mantenimiento de la arquitectura SIG y la geodatabase (A1), la integración y control de calidad de datos espaciales (A2), el preprocesado de distribuciones (A4), la modelización biogeográfica (A5), la construcción de series temporales (A6), los análisis de tendencias y rupturas (A7), el análisis de paisaje y conectividad (A8) y la elaboración de escenarios multicriterio (A9). La elección de portátiles permite, además, su uso en reuniones técnicas, sesiones de validación en campo y actividades de transferencia y difusión (A3 y A10), donde es imprescindible contar con acceso directo a los productos del SIG.

Para garantizar condiciones de trabajo eficientes y ergonómicas durante periodos prolongados de análisis técnico, se contempla la compra de teclados externos y soportes/atriles portátiles para los miembros del equipo que trabajarán de forma intensiva con ordenadores portátiles. Este equipamiento complementa los PCs y contribuye a mejorar la productividad y la seguridad postural.

Dado el volumen y la sensibilidad de la información generada —geodatabases, ráster multitemporales, series temporales, modelos de distribución, productos derivados, inventarios y documentación técnica— se adquirirán discos SSD externos de alta capacidad para todos los miembros del equipo. Estos dispositivos son imprescindibles para la realización de copias de

seguridad inmediatas, la transferencia operativa de datos durante campañas de campo y la preservación de versiones, garantizando la trazabilidad, la seguridad de la información y la continuidad del trabajo.

Asimismo, con el fin de asegurar una documentación de campo homogénea, precisa y plenamente integrable en los flujos del SIG, se prevé la adquisición de tres *smartphones* de gama alta, destinados al Investigador Principal, a la becaria de investigación y al técnico internacional en Marruecos. En la selección de estos dispositivos se priorizarán modelos con cámara de alta calidad, receptor GPS de elevada precisión y altas prestaciones de procesamiento y visualización, de modo que puedan utilizarse de forma efectiva como herramientas de trabajo en campo equivalentes a tabletas robustas. Estos dispositivos permitirán el registro de fotografías y vídeos georreferenciados con metadatos completos, la toma de anotaciones en terreno y la sincronización directa de la información mediante ArcGIS Online (Field Maps) u herramientas equivalentes, reforzando la coherencia técnica de las campañas de campo (A3) y la producción de material para su transferencia y difusión (A10).

Este conjunto de equipamiento prioritario constituye la base operativa sin la cual no sería posible ejecutar las actividades previstas en el proyecto de forma simultánea y eficiente.

5.6.2. Material complementario de apoyo científico-técnico

De forma complementaria, el proyecto propone la adquisición de equipamiento orientado a reforzar la calidad metodológica de los trabajos de campo, la validación ecológica de los análisis con sensores remotos y la interpretación ecofisiológica de los resultados. Esta dotación se plantea como un escenario de referencia coherente con los objetivos científicos del proyecto, susceptible de ajustarse en función de las condiciones presupuestarias de cada convocatoria, manteniendo, en todo caso, la operatividad y la calidad técnica de las actividades previstas.

En primer lugar, se propone la adquisición de un dispositivo de medición GPS, destinado a medir con precisión distancias, perímetros y geometrías en entornos forestales complejos durante las campañas de campo (A3). Este instrumento permitiría optimizar los tiempos de inventario, mejorar la precisión geométrica de los datos y facilitar su integración directa en el SIG, aportando valor adicional a los análisis de paisaje y de conectividad ecológica (A8).

El proyecto prevé, además, el uso de instrumentación ecofisiológica portátil por parte del personal de campo en ambos países. En concreto, se propone la adquisición de dos sondas TDR portátiles de humedad del suelo, una destinada a las campañas en España y otra a las en Marruecos, junto con dos *dataloggers* ambientales, uno por país, que permitirían el registro continuo de variables microclimáticas durante los muestreos. Esta instrumentación proporcionaría una base empírica directa para interpretar dinámicas fenológicas, episodios de estrés y rupturas detectadas en las series espectrales (A6 y A7), así como para apoyar la evaluación de la vulnerabilidad en los escenarios multicriterio (A9), manteniendo un diseño operativo flexible y compatible con campañas de campo itinerantes.

De manera complementaria, se plantea la adquisición de dendrómetros automáticos distribuidos en un mínimo de seis poblaciones representativas de *Abies*, con tres dispositivos por población (dieciocho en total). Esta red mínima replicada permitiría monitorizar de forma continua la respuesta de crecimiento radial de árboles típicos de cada población, captar la variabilidad intrapoblacional básica y proporcionar información ecofisiológica de referencia. Su finalidad sería reforzar la validación de procesos y la atribución mecanística de las señales observadas mediante teledetección, sin requerir un muestreo extensivo.

Finalmente, se contempla la compra de baterías externas de alta capacidad, tarjetas SD y accesorios básicos de registro, necesarios para garantizar la autonomía energética y la continuidad de la captura de datos durante jornadas prolongadas de trabajo en áreas remotas.

5.7. Plan de contingencia: identificación de riesgos y medidas de mitigación

El proyecto incorpora un plan de contingencia orientado a garantizar la continuidad de las actividades, la validez metodológica de los resultados y el cumplimiento de los objetivos científicos ante posibles incidencias técnicas, logísticas, administrativas o científicas. Dicho plan se articula directamente con las actividades del proyecto (A1–A10), lo que permite una gestión flexible y adaptativa de los riesgos. La Tabla 4 presenta el resumen del plan, cuyo desarrollo se detalla a lo largo de este apartado.

Tabla 4. Resumen del plan de contingencia

Actividad / Ámbito	**Riesgos principales**	**Medidas de contingencia**
A1–A2. Arquitectura SIG e integración de datos	Incompatibilidad entre fuentes, cambios en productos, dependencia de software privativo, pérdida de datos	Sustitución por fuentes equivalentes, armonización alternativa, uso paralelo de software libre (QGIS, R), formatos abiertos (GeoPackage, GeoTIFF, OGC), copias de seguridad redundantes en nube y discos externos
Gestión de datos (transversal)	Pérdida, corrupción o acceso no autorizado	Sistema de *backup* redundante: nube institucional, OneDrive ampliado y discos externos físicos
A3. Trabajos de campo	Climatología adversa, restricciones administrativas, problemas logísticos	Reprogramación flexible, validación remota, uso de información secundaria, entrevistas técnicas, contratación de servicios logísticos especializados
A4–A5. Distribuciones y modelización	Sesgos, inestabilidad de modelos, baja capacidad predictiva	Estrategias alternativas de muestreo, pseudoausencias, selección de variables, comparación entre algoritmos, priorización de robustez ecológica
Reproducibilidad (A4–A5)	Falta de replicabilidad	Código reproducible, documentado y versionado publicado en GitHub
A6–A7. Series temporales y tendencias	Ruido, discontinuidades,	Sensores alternativos, agregación temporal/espacial, métodos robustos, corrección por pruebas múltiples, validación cruzada

	cambios de sensor, autocorrelación	
A8. Paisaje y conectividad	Sensibilidad a escala y cartografía base	Análisis multiescalar, pruebas de sensibilidad, configuraciones alternativas
A9. Escenarios multicriterio	Subjetividad en ponderaciones, incertidumbre	Análisis de sensibilidad, escenarios alternativos, validación con expertos y gestores, comité asesor con incentivo de coautoría científica
A10. Transferencia y difusión	Limitaciones de formato o plataforma, retrasos institucionales	Formatos alternativos, ArcGIS Online como principal, Google MyMaps y QGIS Cloud como contingencia
Colaboración internacional (transversal)	Dificultades de coordinación	Trabajo remoto, intercambio de datos, validación cruzada, ajuste de casos de estudio, incentivos científicos
Presupuesto (transversal)	Restricciones financieras	Priorización de actividades nucleares y productos esenciales
Publicaciones científicas	Retrasos editoriales o rechazos	Diversificación de revistas, preprints, congresos, informes técnicos, capítulos de libro

Fuente: elaboración propia.

En relación con las actividades A1 y A2 (arquitectura SIG e integración de datos), los principales riesgos se asocian a problemas de compatibilidad entre fuentes, cambios en la disponibilidad de productos o inconsistencias en la calidad de los datos, así como a la dependencia de software privativo (p. ej., licencias, cambios de versión o restricciones de acceso). Como medidas de contingencia, se contempla la sustitución de fuentes por productos equivalentes, la adaptación de resoluciones espaciales y temporales y el uso de esquemas alternativos de armonización. Asimismo, se garantizará la portabilidad del flujo de trabajo mediante el uso paralelo de soluciones de software libre (QGIS y R) y el empleo de formatos abiertos e interoperables (p. ej., GeoPackage, GeoTIFF y estándares OGC), de modo que el repositorio SIG y los procesos clave puedan ejecutarse y mantenerse operativos independientemente del software disponible.

Dada la importancia estratégica de los datos generados, se implementará, además, un sistema de copias de seguridad redundantes que combine el almacenamiento en la nube institucional y servicios ampliados de tipo OneDrive, junto con copias físicas periódicas en discos duros externos. Este esquema de respaldo garantizará la preservación, recuperación y continuidad del proyecto ante posibles pérdidas, fallos técnicos o incidencias de seguridad, manteniendo la integridad y trazabilidad de toda la información.

En las actividades A3 (trabajos de campo), los riesgos principales están asociados a condiciones meteorológicas adversas, restricciones administrativas, problemas logísticos o limitaciones de acceso a determinadas zonas, especialmente en el ámbito internacional. En estos casos, se prevé la reprogramación flexible de campañas dentro del mismo ciclo anual, la sustitución parcial por validación remota mediante imágenes de alta resolución, y el refuerzo del contraste con información secundaria, entrevistas técnicas y documentación existente. Asimismo, la contratación

de servicios logísticos especializados permite reducir significativamente los riesgos operativos y garantizar la seguridad del equipo.

Para las actividades A4 y A5 (preparación de distribuciones y modelización biogeográfica), los principales riesgos se relacionan con sesgos en los datos, inestabilidad de los modelos o baja capacidad predictiva. Como medidas de contingencia, se contempla la aplicación de estrategias alternativas de muestreo, la generación de pseudoausencias, la selección de variables y la comparación entre algoritmos, priorizando siempre la robustez ecológica y la estabilidad de los resultados frente a la significación estadística puntual.

De forma complementaria, una parte esencial del trabajo consistirá en la elaboración de código reproducible, documentado y versionado, que se publicará en repositorios abiertos (GitHub), de modo que distintos investigadores puedan replicar los análisis y obtener resultados equivalentes a partir de los mismos conjuntos de datos. Esta estrategia permitirá identificar posibles fuentes de inestabilidad metodológica, reforzar la transparencia del proceso de modelización y garantizar la reproducibilidad científica de los productos generados, actuando, además, como mecanismo de control de calidad y de contingencia ante discrepancias, auditorías o revisiones futuras.

En las actividades A6 y A7 (series temporales y análisis de tendencias), los riesgos se asocian al ruido en las series, a discontinuidades temporales, a cambios de sensor o a problemas derivados de la autocorrelación. Las medidas de contingencia incluyen el uso de sensores alternativos, la agregación temporal o espacial, la aplicación de métodos robustos y el refuerzo del control estadístico mediante procedimientos de corrección por pruebas múltiples y validación cruzada. El diseño multinivel del análisis permite adaptar los métodos sin comprometer la coherencia general del enfoque.

Para la actividad A8 (análisis del paisaje y conectividad), los riesgos se vinculan con la sensibilidad de las métricas a la escala y con la calidad de la cartografía base. Como respuesta, se prevé realizar análisis multiescalar, pruebas de sensibilidad y comparaciones entre configuraciones alternativas, garantizando que las conclusiones se apoyen en patrones estables y no en artefactos metodológicos.

En la actividad A9 (evaluación multicriterio de escenarios), los principales riesgos provienen de la subjetividad en la ponderación de los criterios y de la incertidumbre asociada a los escenarios. Como medidas de contingencia, se contempla la aplicación sistemática de análisis de sensibilidad, la generación de escenarios alternativos y la validación técnica con expertos y gestores. De forma complementaria, se prevé la posibilidad de solicitar colaboración puntual a un comité de expertos de carácter asesor, con el incentivo de la participación en publicaciones científicas derivadas del proyecto, cuando proceda. Este enfoque permitirá contrastar las decisiones metodológicas, las ponderaciones y la interpretación de los resultados desde distintas perspectivas disciplinarias, reforzando la transparencia del proceso, reduciendo el sesgo individual y garantizando la solidez y credibilidad de los escenarios generados.

En la actividad A10 (transferencia y difusión), los riesgos se relacionan con limitaciones de formato, con el acceso a plataformas o con retrasos en la validación institucional. Como medidas de contingencia, se priorizarán formatos alternativos funcionalmente equivalentes (visores web, atlas digitales e informes técnicos), garantizando siempre la disponibilidad pública y la utilidad operativa de los productos. Aunque la plataforma principal prevista es ArcGIS Online, se contempla explícitamente, como alternativa, el uso de servicios abiertos o complementarios, como Google My Maps y QGIS Cloud, lo que permitirá asegurar la continuidad de la publicación, el acceso público a la información y la interoperabilidad de los productos, incluso ante posibles restricciones técnicas, administrativas o presupuestarias.

En cuanto a los riesgos transversales, el proyecto contempla posibles limitaciones en la colaboración internacional, que podrán resolverse mediante trabajo remoto, intercambio de datos, validaciones cruzadas y ajuste del peso relativo de los casos de estudio, sin comprometer la lógica comparativa del proyecto. Para favorecer la implicación efectiva de los colaboradores, se utilizarán los principales incentivos propios del ámbito científico, entre los que destacan la participación en publicaciones en revistas de alto prestigio, la visibilidad académica de sus contribuciones y la integración en redes de investigación internacionales, lo que refuerza la motivación y el compromiso de los investigadores implicados.

Asimismo, ante posibles restricciones presupuestarias, se priorizarán las actividades nucleares y los productos esenciales, manteniendo la coherencia científica del conjunto y asegurando que los recursos disponibles se orienten preferentemente a la generación de resultados de alto valor científico y aplicabilidad.

Asimismo, se contempla el riesgo de retrasos en los procesos de publicación científica, derivados de los tiempos editoriales, de las rondas de revisión o de posibles rechazos. Como medida de contingencia, se prevé la diversificación de estrategias de difusión, incluyendo el envío paralelo a revistas alternativas de similar prestigio, la publicación previa de preimpresiones (*preprints*) en repositorios abiertos cuando sea apropiado, y la difusión de resultados mediante informes técnicos, capítulos de libro o comunicaciones en congresos, garantizando, en todo caso, la visibilidad, la trazabilidad y el aprovechamiento científico de los resultados generados.

En conjunto (Tabla 4), el diseño modular, multinivel y progresivo del proyecto constituye en sí mismo un mecanismo de contingencia, al permitir ajustes metodológicos, temporales y operativos sin alterar los objetivos científicos. Este enfoque garantiza que el proyecto mantiene su viabilidad, coherencia y valor científico incluso ante escenarios de incertidumbre o cambio.

6. Impacto esperado

6.1. Publicaciones científicas

La estrategia de publicación del proyecto se concibe no solo como un mecanismo de difusión científica, sino también como un instrumento para dinamizar el trabajo del equipo, incentivar la colaboración y proyectar la trayectoria académica de sus miembros.

Se contempla una producción sostenida, con un objetivo de cuatro artículos científicos por año en revistas internacionales indexadas en JCR y SCOPUS, lo que supone un total estimado de doce artículos a lo largo de las tres anualidades del proyecto. De forma complementaria, se reservará un porcentaje de esta producción para su publicación en revistas científicas en español de reconocido prestigio, con el objetivo de reforzar la transferencia de conocimiento al ámbito iberoamericano, facilitar el acceso a gestores y técnicos, y contribuir a la divulgación científica en lengua española.

Paralelamente, se prevé la presentación de, al menos, dos contribuciones a congresos por año (comunicación oral o póster), alcanzando un total estimado de seis comunicaciones durante el proyecto. De forma complementaria, se planifica la elaboración de un libro/monografía de síntesis y transferencia sobre la Reserva y los abetales, orientado a la puesta en valor y divulgación del conocimiento generado.

Se prestará especial atención a que los investigadores jóvenes y en formación tengan una presencia activa en las publicaciones, promoviendo su participación como coautores cuando proceda, con el objetivo de favorecer su proyección científica, su integración en redes internacionales y su consolidación académica.

La política de publicación se utilizará, por tanto, como un incentivo positivo para fomentar la implicación, la responsabilidad científica y la calidad de los trabajos desarrollados en el marco del proyecto.

Las principales revistas candidatas, organizadas por ámbitos temáticos, editoriales y cuartiles de referencia, se presentan como el marco de referencia para la estrategia de publicación, manteniendo la flexibilidad necesaria para adaptar los envíos ante posibles retrasos editoriales, rondas de revisión prolongadas o decisiones editoriales:

- Biogeografía y distribución de especies:
    - Global Ecology and Biogeography — Wiley — Q1
    - Journal of Biogeography — Wiley — Q1
    - Diversity and Distributions — Wiley — Q1
    - Ecography — Wiley — Q1
    - Biological Conservation — Elsevier — Q1
    - Bosque (en español) — Universidad Austral de Chile — Q3

- Teledetección Ambiental:
    - Remote Sensing of Environment — Elsevier — Q1
    - Remote Sensing — MDPI — Q1
    - Remote Sensing in Ecology and Conservation — Wiley — Q1
    - IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing (JSTARS) — IEEE — Q1
    - Revista de Teledetección (en español) — Asociación Española de Teledetección — Q4

- Ecología forestal y conservación:
    - Forest Ecology and Management — Elsevier — Q1
    - Annals of Forest Science — Springer — Q2
    - European Journal of Forest Research — Springer — Q2
    - Ecological Indicators — Elsevier — Q1
    - Environmental Management — Springer — Q2

- Paisaje, conectividad y planificación territorial:
    - Landscape Ecology — Springer — Q1
    - Landscape and Urban Planning — Elsevier — Q1
    - Applied Geography — Elsevier — Q2
    - Land Use Policy — Elsevier — Q1
    - Journal of Environmental Management — Elsevier — Q1

- Modelización y métodos:
    - Ecological Modelling — Elsevier — Q2
    - Methods in Ecology and Evolution — Wiley — Q1
    - Environmental Modelling & Software — Elsevier — Q1
    - Spatial Statistics — Elsevier — Q2

- Enfoque integrador / Ambiental:
    - Regional Environmental Change — Springer — Q1
    - Environmental Research — Elsevier — Q1
    - Biodiversity and Conservation — Springer — Q2

La selección final de la revista para cada manuscrito dependerá del enfoque específico del trabajo, priorizando siempre la calidad científica, la coherencia temática y la visibilidad internacional. Se fomentará el acceso abierto cuando sea posible, así como el depósito de datos y de código en repositorios abiertos, en coherencia con los principios de la ciencia abierta.

La participación en congresos (dos contribuciones por año, preferentemente comunicaciones orales) se orientará a foros nacionales e internacionales directamente vinculados con las líneas del

proyecto: biogeografía y ecología de la conservación, teledetección y SIG, análisis del paisaje y conectividad, y gestión territorial de espacios protegidos.

En el ámbito nacional, se priorizarán el Congreso de la Asociación Española de Geografía (AGE) y, en particular, el Congreso del Grupo de Tecnologías de la Información Geográfica (TIG-AGE), así como el Congreso de la Asociación Española de Ecología Terrestre (AEET).

En el ámbito internacional, se considerarán como foros preferentes el congreso de la International Biogeography Society (IBS), los encuentros de EUROGEO – The European Association of Geographers, así como los congresos y reuniones científicas vinculadas a la Unión Geográfica Internacional (UGI/IGU), además de otros eventos internacionales especializados que resulten especialmente adecuados para la presentación de los resultados metodológicos y aplicados del proyecto.

En conjunto, esta estrategia de publicación permitirá:

- Maximizar el impacto científico del proyecto.
- Incentivar la participación activa del equipo.
- Favorecer la proyección de investigadores jóvenes.
- Reforzar la dimensión internacional del proyecto.
- Garantizar la transferencia del conocimiento generado.

6.2. Plan de difusión y divulgación

La estrategia de difusión del proyecto se concibe como un proceso continuo, estructurado y multicanal, orientado tanto a la comunidad científica como a la sociedad en general, con especial atención a la transferencia del conocimiento a gestores, técnicos, responsables institucionales y a la ciudadanía.

El proyecto contará con el apoyo de los gabinetes de comunicación de los centros participantes, que colaborarán en la elaboración, producción y difusión de notas de prensa, comunicados institucionales y piezas divulgativas asociadas a los principales hitos y resultados del proyecto, a fin de favorecer su proyección en medios de comunicación generalistas y especializados.

El equipo participará asimismo en eventos de divulgación científica, tales como la Noche Europea de los Investigadores, la Noche de la Ciencia y otras iniciativas similares, con el objetivo de acercar los resultados del proyecto a públicos no especializados y fomentar la cultura científica.

De forma complementaria, se promoverá activamente la difusión a través de redes sociales científicas y generalistas, incluyendo X (Twitter), BlueSky, Facebook y YouTube, utilizando formatos adaptados a cada plataforma. En este contexto, se aprovechará el canal de Geografía Operativa como espacio estable de difusión, que permitirá incorporar piezas multimedia de diversos tipos, tales como vídeos divulgativos, cápsulas explicativas, infografías, mapas interactivos, presentaciones comentadas y resúmenes interpretativos de los resultados.

En el ámbito técnico y operativo, el proyecto desarrollará servicios web cartográficos basados en ArcGIS Online, incluyendo Instant Apps, cuadros de mando (Dashboards) y StoryMaps, orientados a la visualización interactiva de indicadores, escenarios y productos espaciales. Estos servicios estarán diseñados con criterios de claridad interpretativa, accesibilidad e interoperabilidad, facilitando su consulta y reutilización por parte de gestores, técnicos, investigadores y público interesado.

A través de los centros involucrados, además, se promoverá la organización de un simposio científico-técnico específico sobre los resultados y el contexto metodológico del proyecto, concebido como un espacio de intercambio entre investigadores, gestores, técnicos, responsables institucionales y agentes territoriales. Este encuentro permitirá presentar los principales productos del proyecto, contrastar enfoques, debatir las implicaciones para la gestión y favorecer la transferencia efectiva del conocimiento a la práctica. Se procurará implicar activamente a administraciones públicas, entidades de conservación, asociaciones profesionales y otros actores relevantes, reforzando la dimensión aplicada del proyecto y su conexión con las necesidades reales del territorio.

En conjunto, esta estrategia de difusión permitirá maximizar la visibilidad del proyecto, reforzar su impacto científico y social, fomentar la transferencia del conocimiento y garantizar que los resultados generados trasciendan el ámbito académico para integrarse de forma efectiva en los procesos de gestión, planificación territorial, conservación y sensibilización ambiental.

6.3. Plan de formación

El proyecto incorpora un plan de formación orientado a la capacitación técnica, metodológica y científica de las tres figuras en formación previstas: becario de iniciación, técnico en garantía juvenil y becario de investigación. La formación se concibe como un proceso activo, vinculado directamente a las actividades del proyecto y orientado tanto a la adquisición de competencias prácticas como al desarrollo de una cultura científica rigurosa, reproducible y aplicada.

El becario de iniciación recibirá una formación básica en gestión de la información científica, organización de bases de datos, manejo inicial de SIG, lectura crítica de la literatura científica y apoyo en tareas de recopilación, depuración y documentación de la información. Su formación se orientará a la adquisición de competencias fundamentales en el trabajo científico, a la introducción a la geografía ambiental y a la comprensión del flujo general del proyecto, lo que facilitará una primera aproximación estructurada a la investigación.

El técnico en garantía juvenil recibirá una formación eminentemente práctica en sistemas de información geográfica, gestión de bases de datos espaciales, apoyo al trabajo de campo, control de la calidad de la información territorial y producción de cartografía temática. Su formación se centrará en el desarrollo de competencias operativas directamente transferibles al ámbito profesional, combinando el uso de software privativo y libre, la aplicación de protocolos de trabajo reproducibles y la participación en la generación de productos cartográficos y técnicos del proyecto.

El becario de investigación recibirá una formación avanzada y transversal en análisis espacial, modelización biogeográfica, series temporales, estadística aplicada, reproducibilidad científica y redacción de manuscritos científicos. Participará activamente en todas las fases del proyecto, con un enfoque formativo progresivo que incluirá la preparación de publicaciones, la presentación de resultados en congresos y la elaboración de productos científicos propios, siempre bajo la supervisión del equipo investigador.

De forma complementaria, las tres figuras formativas participarán en sesiones internas periódicas de seguimiento y formación, en las que se abordarán aspectos metodológicos, la discusión de resultados, la revisión crítica de la literatura, las buenas prácticas de gestión de datos, la ética científica y los principios de la ciencia abierta. Asimismo, se fomentará la participación en cursos, seminarios y actividades formativas externas relacionadas con SIG, teledetección, análisis estadístico, redacción científica y divulgación.

El plan de formación se orienta no solo a la adquisición de competencias técnicas, sino también al desarrollo de capacidades transversales, como el trabajo en equipo y la solidaridad, la comunicación científica, la gestión del tiempo, la resolución de problemas, el compromiso con el cumplimiento de plazos y la responsabilidad en el manejo de datos y resultados.

En conjunto, este plan de formación permitirá que las tres figuras en formación se integren plenamente en la dinámica del proyecto, adquieran competencias reales y transferibles, y contribuyan de forma efectiva a los resultados científicos y operativos del proyecto, al tiempo que refuerza su proyección académica y profesional

6.4. Transferencia

La transferencia del conocimiento generado por el proyecto se orientará prioritariamente a su aplicación directa en la gestión de los ecosistemas forestales, la gestión ambiental y la conservación adaptativa de los paisajes objeto de estudio, tanto en Andalucía como en el norte de Marruecos. Desde su concepción, el proyecto integra un enfoque operativo, de modo que los productos científicos se diseñan para ser utilizados por gestores, técnicos y responsables institucionales, y no únicamente con fines académicos.

Los principales resultados se materializarán en forma de cartografía temática interpretada, indicadores espaciales de estado, dinámica y vulnerabilidad, escenarios multicriterio de conservación y conectividad ecológica, y herramientas digitales interactivas (visores web, *dashboards* y aplicaciones SIG en línea). Estos productos irán acompañados de documentación técnica detallada y guías de uso orientadas a facilitar su correcta interpretación e integración en procesos reales de planificación territorial, gestión de espacios protegidos y evaluación ambiental. De manera específica, los escenarios multicriterio permitirán identificar áreas prioritarias para la conservación, la restauración y la conectividad ecológica, así como zonas de conflicto entre la presión antrópica y los valores ecológicos, proporcionando una base objetiva para la toma de decisiones territoriales. Asimismo, los productos derivados de la modelización biogeográfica y del análisis de la dinámica fenológica aportarán información clave para anticipar los impactos del cambio climático, evaluar riesgos y diseñar estrategias de gestión adaptativa.

La transferencia se articulará mediante un proceso de interacción directa con las administraciones ambientales competentes y con los equipos gestores del Parque Nacional de la Sierra de las Nieves (España) y del Parque Nacional de Talassemtane (Marruecos), así como con otras autoridades responsables de la conservación y la planificación territorial en ambos países. Este proceso incluirá sesiones de contraste técnico, talleres de trabajo y reuniones específicas en las que se presentarán los resultados intermedios y finales, se recogerá retroalimentación y se ajustarán los productos para maximizar su utilidad operativa. En este contexto, la colaboración institucional con el Centro de Cooperación del Mediterráneo de la UICN (UICN-Med) reforzará la proyección aplicada del proyecto, facilitando la conexión con iniciativas de conservación a escala mediterránea, la difusión de buenas prácticas y la incorporación de los resultados en redes y programas internacionales de gestión de la biodiversidad.

La organización de talleres técnicos y del simposio científico-técnico previsto en el plan de difusión actuará como un espacio específico de transferencia y coproducción de conocimiento, promoviendo el intercambio entre investigadores, gestores de espacios protegidos y responsables institucionales, y favoreciendo la traducción de los resultados científicos en herramientas concretas para la toma de decisiones. En conjunto, la transferencia no se concibe como una fase final aislada, sino como un proceso continuo integrado en el desarrollo del proyecto, que acompaña la generación de datos, análisis y productos desde etapas tempranas. Este enfoque garantiza que el conocimiento generado trascienda el ámbito académico.

7. Financiación

7.1. Necesidades presupuestarias

El presente apartado presupuestario se formula con carácter propositivo y orientativo, acorde con la naturaleza preliminar de esta memoria y con el hecho de que el proyecto aún no ha sido presentado a convocatorias de financiación concretas. En consecuencia, no se incluyen cuantificaciones económicas cerradas, sino una identificación razonada de los principales bloques de gasto necesarios para garantizar la viabilidad científica, técnica y operativa del proyecto. La estimación detallada de costes se ajustará posteriormente a los requisitos específicos, los límites presupuestarios y los criterios de elegibilidad de cada convocatoria a la que se concurra.

El presupuesto del proyecto se estructura prioritariamente en torno a los recursos humanos necesarios para el desarrollo científico, técnico y operativo de las actividades previstas, complementados por partidas de equipamiento, logística de campo, servicios externos, edición y difusión, que permiten garantizar la viabilidad y la calidad de los resultados.

El principal esfuerzo presupuestario se destina a la contratación y financiación de personal investigador y técnico, considerado el eje fundamental del proyecto. En este sentido, se contempla la dotación de una beca de investigación, orientada al desarrollo analítico y metodológico del proyecto, con participación transversal en las actividades de integración de datos, modelización biogeográfica, análisis de series temporales, evaluación multicriterio y elaboración de productos científicos y operativos. Asimismo, se prevé la financiación de una beca de iniciación, destinada a apoyar tareas de recopilación, organización de información, trabajo de campo y aprendizaje progresivo en biogeografía y SIG. El presupuesto incorpora igualmente la contratación de un técnico en el marco del programa de Garantía Juvenil, orientado al apoyo en sistemas de información geográfica, gestión de bases de datos y campañas de campo, así como, cuando las condiciones de convocatoria lo permitan, la posible incorporación de un técnico de apoyo a la investigación proveniente de programas estatales, con el fin de reforzar las tareas técnicas del proyecto. Se contemplan asimismo los costes asociados a la participación del personal investigador sénior colaborador, así como al técnico internacional de enlace en Marruecos, cuya implicación resulta clave para la coordinación científica, la interlocución institucional y la ejecución de las campañas de campo transfronterizas.

En segundo lugar, el presupuesto propone la adquisición de equipamiento prioritario e imprescindible para la operatividad del equipo, incluyendo cuatro ordenadores portátiles de altas prestaciones, teclados externos y atriles ergonómicos, discos SSD externos de alta capacidad y tres smartphones de gama alta, concebidos como herramientas de trabajo de campo para la documentación georreferenciada y la sincronización con el SIG. De forma complementaria, se prevé la dotación de equipamiento científico-técnico orientado a reforzar la calidad metodológica de las validaciones de campo y la interpretación ecofisiológica de los resultados, incluyendo un dispositivo MOASURE ONE para mediciones geométricas precisas, sensores ambientales portátiles, dos sondas

TDR portátiles de humedad del suelo, dos *dataloggers* ambientales y una red mínima de dendrómetros automáticos distribuidos en poblaciones representativas de Abies.

El presupuesto debe incorporar, además, las partidas necesarias para la realización de campañas de campo, incluyendo desplazamientos nacionales e internacionales, estancias, dietas y logística, así como la contratación de servicios externos especializados para la organización integral de los trabajos en el Parque Nacional de Talassemtane (Marruecos), conforme a lo descrito en el apartado correspondiente.

Asimismo, se contemplan recursos destinados a la producción editorial y de transferencia, incluyendo la elaboración de una monografía científico-divulgativa y la publicación de una monografía científica internacional, así como a la organización de talleres técnicos y del simposio científico-técnico previsto en el plan de difusión.

Finalmente, el presupuesto debe incluir partidas menores destinadas a material fungible de campo, autonomía energética, tasas de publicación científica, producción de materiales gráficos y audiovisuales y participación en congresos científicos, en coherencia con las acciones de difusión y transferencia.

En conjunto, el presupuesto solicitado se plantea como un escenario coherente y proporcionado, centrado fundamentalmente en la inversión en capital humano como motor del proyecto, y complementado por recursos materiales y logísticos estrictamente necesarios para asegurar la viabilidad operativa, la calidad científica de los análisis y el impacto aplicado de los resultados.

7.2. Financiación pública

El proyecto se orienta prioritariamente a la captación de financiación pública competitiva, proveniente de distintos niveles administrativos y de programas de investigación, con el fin de garantizar su viabilidad, estabilidad y proyección a mediano y largo plazo.

En el ámbito institucional, se contempla la solicitud de ayudas del Plan Propio de Investigación de la Universidad de Málaga como instrumento de apoyo inicial, de cofinanciación y de refuerzo de las actividades específicas del proyecto.

A escala autonómica, el proyecto se presentará a las convocatorias de proyectos de investigación de la Junta de Andalucía, en sus distintas modalidades, orientadas tanto a la investigación básica como a la aplicada en los ámbitos ambiental, territorial y de conservación.

En el ámbito estatal, se prevé la participación en convocatorias del Plan Nacional de I+D+i, promovidas por la Agencia Estatal de Investigación, así como en convocatorias específicas del Organismo Autónomo de Parques Nacionales (OAPN), especialmente adecuadas por la vinculación directa del proyecto con espacios protegidos de alto valor ecológico. Asimismo, se contempla la presentación del proyecto a convocatorias de proyectos financiados por la Fundación Biodiversidad, en sus distintas líneas de apoyo a iniciativas de conservación, restauración ecológica, biodiversidad, cambio climático y transferencia al ámbito de la gestión, particularmente pertinentes por el carácter aplicado y territorial del proyecto.

Finalmente, el proyecto se concibe con una clara proyección internacional, por lo que se contempla su presentación a convocatorias de financiación europea, incluyendo programas marco de investigación y otros instrumentos de cooperación científica y territorial, orientados a la biodiversidad, el cambio climático, la gestión de ecosistemas y la sostenibilidad.

Esta estrategia de financiación pública diversificada permite reducir la dependencia de una única fuente de recursos, aumentar la resiliencia del proyecto frente a resultados competitivos desfavorables y facilitar su continuidad y escalabilidad en el tiempo.

7.3. Financiación privada

De forma complementaria a la financiación pública, el proyecto contempla la posibilidad de captar financiación privada de carácter competitivo, proveniente de fundaciones y entidades que desarrollan programas estables de apoyo a la investigación científica, la conservación ambiental y la sostenibilidad.

En este contexto, se consideran como entidades prioritarias la Fundación BBVA y la Fundación ”la Caixa”, ambas con una amplia trayectoria en la financiación de proyectos de investigación, biodiversidad, cambio climático, conservación del patrimonio natural y transferencia del conocimiento. Estas entidades representan una vía especialmente adecuada para reforzar determinadas líneas del proyecto, apoyar actividades específicas (trabajo de campo, difusión, formación o transferencia) y facilitar la proyección social de los resultados.

La captación de financiación privada se concibe como un complemento estratégico, no sustitutivo, de la financiación pública, lo que permite diversificar las fuentes de recursos, aumentar la flexibilidad operativa del proyecto y reforzar su sostenibilidad económica. Asimismo, esta vía contribuirá a fortalecer la conexión del proyecto con el ámbito social y fundacional, favoreciendo la visibilidad y el impacto social de los resultados obtenidos

8. Ética

El proyecto se desarrollará conforme a los siguientes principios:

1. Integridad científica, garantizando la transparencia, el rigor metodológico y la reproducibilidad de los resultados.
2. Compromiso con la accesibilidad del conocimiento, favoreciendo el acceso abierto a los resultados siempre que las políticas editoriales y de financiación lo permitan.
3. Difusión responsable de los resultados, evitando exageraciones, simplificaciones indebidas o interpretaciones sensacionalistas de los hallazgos científicos.
4. Compromiso con la transferencia del conocimiento y la cooperación internacional, promoviendo el intercambio de resultados, metodologías y buenas prácticas con instituciones, grupos de investigación y agentes sociales de distintos países, a fin de maximizar el impacto científico, social y territorial del proyecto.
5. Uso responsable de los datos provenientes de fuentes públicas y privadas, respetando las licencias, las condiciones de uso y las normas de citación correspondientes.
6. Respeto ambiental, evitando intervenciones directas en el medio natural y minimizando cualquier impacto asociado al desarrollo del proyecto.
7. Ausencia de experimentación con personas o animales, por lo que no se requiere la evaluación por parte de un comité ético.
8. Perspectiva de género y diversidad, promoviendo la igualdad de oportunidades, la no discriminación y la diversidad en los procesos de selección y contratación del personal.
9. Condiciones dignas de trabajo, garantizando un entorno laboral seguro, saludable, respetuoso y libre de toda forma de discriminación o acoso.
10. Minimización de residuos y del consumo de papel, priorizando el uso de documentación digital, el almacenamiento electrónico de datos y prácticas de trabajo sostenibles que reduzcan el impacto ambiental del proyecto.

9. Continuidad

El presente proyecto se concibe como una etapa dentro de una línea de investigación de mayor recorrido, orientada a consolidar y ampliar el conocimiento generado más allá de su periodo de ejecución. Los resultados obtenidos servirán como base para el desarrollo de futuras propuestas de investigación, la ampliación de colaboraciones nacionales e internacionales y la integración en redes científicas especializadas en biogeografía, conservación y gestión adaptativa de ecosistemas forestales mediterráneos.

Asimismo, se prevé que las metodologías, bases de datos y productos generados puedan reutilizarse y adaptarse a nuevos contextos de estudio, favoreciendo la continuidad científica, la transferencia del conocimiento y la generación de sinergias con otros proyectos, instituciones y agentes sociales. En este marco, se mantendrá y actualizará un Sistema de Información Geográfica (SIG) interoperable que permitirá la gestión, visualización y difusión de la información espacial

generada, facilitando su uso tanto en investigación como en gestión territorial y en la toma de decisiones.

De forma complementaria, el proyecto aspira a reforzar las redes de cooperación técnica y científica entre los territorios de la Reserva de la Biosfera Intercontinental del Mediterráneo, promoviendo el intercambio de experiencias, la asistencia técnica especializada y el desarrollo de estrategias conjuntas de gestión y conservación. De este modo, el proyecto contribuirá de manera sostenida al avance del conocimiento y al fortalecimiento de la cooperación internacional, más allá de los objetivos específicos inicialmente planteados.

Referencias

Alaoui, A., Laaribya, S., Ayan, S., Ghallab, A., & López-Tirado, J. (2021). Modelling spatial distribution of endemic Moroccan fir (Abies marocana Trabut) in Talassemtane National Park, Morocco. *Austrian Journal of Forest Science*, *138*(2), 73-94.

Alaoui, M. L., Knees, S., & Gardner, M. (2010). Abies pinsapo var. marocana. The IUCN Red List of Threatened Species 2011: e.T34126A9841418. En *IUCN Red List of Threatened Species*. https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2011-2.RLTS.T34126A9841418.en

Andrieux, J., Fontboté, J. M., & Mattauer, M. (1971). Sur un modele explicatif de l'arc de Gibraltar. *Earth and Planetary Science Letters*, *12*(2), 191-198. https://doi.org/10.1016/0012-821X(71)90077-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

Araújo, M. B., & Rahbek, C. (2006). How does climate change affect biodiversity? *Science (New York, N.Y.)*, *313*(5792), 1396-1397. https://doi.org/10.1126/science.1131758

Arista, A., Alaoui, M. L., Knees, S., & Gardner, M. (2010). Abies pinsapo. The IUCN Red List of Threatened Species 2011: e.T42295A10679577. En *IUCN Red List of Threatened Species*. https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2011-2.RLTS.T42295A10679577.en

Aussenac, G. (2002). Ecology and ecophysiology of circum-Mediterranean firs in the context of climate change. *Annals of Forest Science*, *59*(8), 823-832. https://doi.org/10.1051/forest:2002080

Bajjali, W. (2023). *ArcGIS Pro and ArcGIS Online*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42227-0

Balao, F., Lorenzo, M. T., Sánchez-Robles, J. M., Paun, O., García-Castaño, J. L., & Terrab, A. (2020). Early diversification and permeable species boundaries in the Mediterranean firs. *Annals of Botany*, *125*(3), 495-507. https://doi.org/10.1093/aob/mcz186

Baranyi, G., Saura, S., Podani, J., & Jordán, F. (2011). Contribution of habitat patches to network connectivity: Redundancy and uniqueness of topological indices. *Ecological Indicators*, *11*(5), 1301-1310. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.02.003

Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future köppen-geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, *5*, 1-12. https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214

Bender, R., & Lange, S. (2001). Adjusting for multiple testing—when and how? *Journal of Clinical Epidemiology*, *54*(4), 343-349. https://doi.org/10.1016/S0895-4356(00)00314-0

Benjamini, Y. (2010a). Discovering the False Discovery Rate. *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, *72*(4), 405-416. https://doi.org/10.1111/j.1467-9868.2010.00746.x

Benjamini, Y. (2010b). Simultaneous and selective inference: Current successes and future challenges. *Biometrical Journal*, *52*(6), 708-721. https://doi.org/10.1002/bimj.200900299

Benjamini, Y. (2020). Selective Inference: The Silent Killer of Replicability. *Harvard Data Science Review*, *2*(4). https://doi.org/10.1162/99608f92.fc62b261

Benjamini, Y., & Hochberg, Y. (1995). Controlling the False Discovery Rate: A Practical and Powerful Approach to Multiple Testing. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, *57*, 89--300. https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1995.tb02031.x

Benjamini, Y., Krieger, A. M., & Yekutieli, D. (2006). Adaptive linear step-up procedures that control the false discovery rate. *Biometrika*, *93*(3), 491-507. https://doi.org/10.1093/biomet/93.3.491

Ben-Said, M. (2022). The taxonomy of Moroccan fir Abies marocana Trab. (Pinaceae): conceptual clarifications from phylogenetic studies. *Mediterranean Botany*, *43*, e71201. https://doi.org/10.5209/mbot.71201

Ben-Said, M., El Aich, N., Berrad, F., & Ghallab, A. (2024). Knowledge status of the endemic Moroccan fir forest (Abies marocana Trab.): achievements, gaps, and new research axes. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Vie*, *46*, 01-16.

Ben-Said, M., & Sakar, E. H. (2023). A systematic review on the endemic Moroccan fir (Abies marocana Trab.) and its implications for conservation and future research perspectives. En *Folia Geobotanica* (Vol. 58, Número 1, pp. 31-53). Institute for Ionics. https://doi.org/10.1007/s12224-023-09434-5

Bodin, Ö., & Saura, S. (2010). Ranking individual habitat patches as connectivity providers: Integrating network analysis and patch removal experiments. *Ecological Modelling*, *221*(19), 2393-2405. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.06.017

Boissier, E. (1837). *Notice sur l'Abies pinsapo*. Tiré de la Bibliothèque Universelle de Genève. https://bibdigital.rjb.csic.es/idurl/1/9536

Bosque Sendra, J., & Moreno Jiménez, A. (2004). *Sistemas de Información Geográfica y localización óptima de instalaciones y equipamientos*. Ra-Ma.

Boubekraoui, H., Attar, Z., Maouni, Y., Ghallab, A., Saidi, R., & Maouni, A. (2024). Forest Loss Drivers and Landscape Pressures in a Northern Moroccan Protected Areas' Network: Introducing a Novel Approach for Conservation Effectiveness Assessment. *Conservation*, *4*(3), 452-485. https://doi.org/10.3390/conservation4030029

Bridgewater, P. B. (2002). Biosphere reserves: special places for people and nature. *Environmental Science & Policy*, *5*(1), 9-12. https://doi.org/10.1016/S1462-9011(02)00018-7

Bryden, H. L., Candela, J., & Kinder, T. H. (1994). Exchange through the Strait of Gibraltar. *Progress in Oceanography*, *33*(3), 201-248. https://doi.org/10.1016/0079-6611(94)90028-0

Candela, J. (1991). The Gibraltar Strait and its role in the dynamics of the Mediterranean Sea. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, *15*(3-5), 267-299. https://doi.org/10.1016/0377-0265(91)90023-9

Caparros-Santiago, J. A., Rodriguez-Galiano, V., & Dash, J. (2021). Land surface phenology as indicator of global terrestrial ecosystem dynamics: A systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *171*, 330-347. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.11.019

Castro, I., Stan, A. B., Taiqui, L., Schiefer, E., Ghallab, A., Derak, M., & Fulé, P. Z. (2022). Detecting Fire-Caused Forest Loss in a Moroccan Protected Area. *Fire*, *5*(2), 51. https://doi.org/10.3390/fire5020051

Caudullo, G., & Tinner, W. (2016). *Abies*--Circum-Mediterranean firs in Europe: distribution, habitat, usage and threats. En *European Atlas of Forest Tree Species* (p. e01e1b6+). European Commission.

Chen, S., Fu, Y. H., Hao, F., Li, X., Zhou, S., Liu, C., & Tang, J. (2022). Vegetation phenology and its ecohydrological implications from individual to global scales. *Geography and Sustainability*, *3*(4), 334-338. https://doi.org/10.1016/j.geosus.2022.10.002

Chergui, B., Fahd, S., Santos, X., & Pausas, J. G. (2024). Moroccan cannabis farms threaten biodiversity. *Science*, *385*(6712), 941-941. https://doi.org/10.1126/science.adq5140

Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental*. Ariel.

Chuvieco Salinero, E., Pons Fernández, X., Conesa García, C., Santos Preciado, J. M., Bosque Sendra, J., Gutiérrez Puebla, J., de la Riva Fernández, J. R., Salado García, M. J., Ojeda Zújar, J., Martín Isabel, M. del P., & Prados Velasco, M. J. (2005). ¿Son las tecnologías de la información geográfica (TIG) parte del núcleo de la Geografía? *Boletín de la Asociación de Geográfos Españoles*, *40*, 35-55. http://www.boletinage.com/articulos/40/02-SON LAS TECNOLOGIAS.pdf

Civiero, C., Custódio, S., Duarte, J. C., Mendes, V. B., & Faccenna, C. (2020). Dynamics of the Gibraltar Arc System: A Complex Interaction Between Plate Convergence, Slab Pull, and Mantle Flow. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *125*(7). https://doi.org/10.1029/2019JB018873

Consejería de Medio Ambiente. (2012). *Reserva de la biosfera intercontinental del Mediterráneo: Andalucía (España)- Marruecos*. Junta de Andalucía.

Correa Ayram, C. A., Mendoza, M. E., Etter, A., & Salicrup, D. R. P. (2016). Habitat connectivity in biodiversity conservation: A review of recent studies and applications. *Progress in Physical Geography*, *40*(1), 7-37. https://doi.org/10.1177/0309133315598713

Costello, M. J., Vale, M. M., Kiessling, W., Maharaj, S., Price, J., & Talukdar, G. H. (2022). Cross-Chapter Paper 1: Biodiversity Hotspots. En H. O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, & B. Rama (Eds.), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 2123-2161). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009325844.018.2123

Cuttelod, A., García, N., Abdul Malak, D., Temple, H., & Katariya, V. (2008). The Mediterranean: a biodiversity hotspot under threat. En *The 2008 Review of The IUCN Red List of Threatened Species*. IUCN.

Daigle, R. M., Metaxas, A., Balbar, A. C., McGowan, J., Treml, E. A., Kuempel, C. D., Possingham, H. P., & Beger, M. (2020). Operationalizing ecological connectivity in spatial conservation planning with Marxan Connect. *Methods in Ecology and Evolution*, *2020*(February 2019), 1-10. https://doi.org/10.1111/2041-210X.13349

Den Ouden, P. (1982). *Abies* (pp. 1-472). https://doi.org/10.1007/978-94-009-9759-2_1

Dering, M., Sekiewicz, K., Boratyńska, K., Litkowiec, M., Iszkuło, G., Romo, A., & Boratyński, A. (2014). Genetic diversity and inter-specific relations of western Mediterranean relic Abies taxa as compared to the Iberian A. alba. *Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, *209*(7), 367-374. https://doi.org/10.1016/j.flora.2014.03.011

Eamus, D., Huete, A., & Yu, Q. (2016). *Vegetation Dynamics. A Synthesis of Plant Ecophysiology, Remote Sensing and Modelling*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781107286221

Eastman, J. R., Sangermano, F., Ghimire, B., Zhu, H., Chen, H., Neeti, N., Cai, Y., Machado, E. a., & Crema, S. C. (2009). Seasonal trend analysis of image time series. *International Journal of Remote Sensing*, *30*(10), 2721-2726. https://doi.org/10.1080/01431160902755338

Eastman, J. R., Sangermano, F., Machado, E. A., Rogan, J., & Anyamba, A. (2013). Global trends in seasonality of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), 1982-2011. *Remote Sensing*, *5*(10), 4799-4818. https://doi.org/10.3390/rs5104799

Eastman, R. (1999). Multi-criteria evaluation and GIS. *Geographical information systems*, *1*(1), 493-502.

Eddy, I. M. S., & Gergel, S. E. (2014). Why landscape ecologists should contribute to life cycle sustainability approaches. *Landscape Ecology*, *30*(2), 215-228.

Eerens, H., Haesen, D., Rembold, F., Urbano, F., Tote, C., & Bydekerke, L. (2014). Image time series processing for agriculture monitoring. *Environmental Modelling and Software*, *53*, 154-162. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.10.021

Escandón-Panchana, P., Velastegui-Montoya, A., Pico-Saltos, R., & Martínez-Cuevas, S. (2025). Applications of geomatics in multidisciplinary knowledge fields. A review for decision-makers. *Discover Applied Sciences*, *7*(12), 1409. https://doi.org/10.1007/s42452-025-07928-9

Faccenna, C., Piromallo, C., Crespo-Blanc, A., Jolivet, L., & Rossetti, F. (2004). Lateral slab deformation and the origin of the western Mediterranean arcs. *Tectonics*, *23*(1). https://doi.org/10.1029/2002TC001488

Felicísimo, A. M., & Gómez-Muñoz, A. (2004). GIS and predictive modeling : a comparison of methods applied to forestal management and decision-making. En U. of E. Anglia (Ed.), *Geographical Information Systems Research UK 12th Annual Conference* (pp. 143-144).

Felicísimo, Ángel. M., Francés, E., Fernández, J. M., González Díez, A., & Varas, J. (2002). Modeling the potential distribution of forests with a GIS. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, *68*(5), 455-461.

Fischer, J., & Lindenmayer, D. B. (2007). Landscape modification and habitat fragmentation: A synthesis. *Global Ecology and Biogeography*, *16*(3), 265-280. https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2007.00287.x

Forman, R. T. T., & Godron, M. (1981). Patches and structural components for a landscape ecology. *BioScience*, *31*(10), 733-740. https://doi.org/10.1016/j.athoracsur.2007.01.061

Forman, R. T. T., & Godron, M. (1986). Landscape Ecology. *Landscape Ecology*, *17*, 848. https://doi.org/10.2307/2402669

Fourcade, Y., Besnard, A. G., & Secondi, J. (2018). Paintings predict the distribution of species, or the challenge of selecting environmental predictors and evaluation statistics. *Global Ecology and Biogeography*, *27*(2), 245-256. https://doi.org/10.1111/geb.12684

Franklin, J. (2010). *Mapping Species Distributions* (C. U. Press, Ed.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511810602

Galpern, P., Manseau, M., & Fall, A. (2011). Patch-based graphs of landscape connectivity: A guide to construction, analysis and application for conservation. *Biological Conservation*, *144*(1), 44-55. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.09.002

Garcia-Castellanos, D., Estrada, F., Jiménez-Munt, I., Gorini, C., Fernàndez, M., Vergés, J., & De Vicente, R. (2009). Catastrophic flood of the Mediterranean after the Messinian salinity crisis. *Nature*, *462*(7274), 778-781. https://doi.org/10.1038/nature08555

Gergel, S. E., & Turner, M. G. (Eds.). (2017). *Learning Landscape Ecology*. Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6374-4

Gómez Delgado, M. (2005). *Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. Ra-Ma.

Griffith, J. A., Martinko, E. A., Whistler, J. K., & Price, K. P. (2002). Interrelationships among landscapes, NDVI, and stream water quality in the U.S. Central Plains. *Ecological Applications*, *12*(6), 1702-1718. https://doi.org/10.1890/1051-0761(2002)012[1702:IALNAS]2.0.CO;2

Guisan, A., & Zimmermann, N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, *135*(2-3), 147-186. https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00354-9

Gutiérrez Hernández, O. (2018). Impacto del calentamiento global en la distribución y supervivencia del pinsapo (Serranía de Ronda). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, *76*, 504-549. https://doi.org/10.21138/bage.2532

Gutiérrez Hernández, O. (2019). Introducción a las Simulaciones Geomáticas: teoría y práctica. En *Las humanidades en el mundo digital / El mundo digital en las humanidades* (pp. 83-92). Tirant Humanidades.

Gutiérrez Hernández, O. (2025). Mapping the distribution of Abies marocana: Geospatial reference data for biogeographical research and conservation. *2025 EUROGEO Annual Meeting and Conference*.

Gutiérrez Hernández, O., Cámara Artigas, R., Senciales González, J. M., & García, L. V. (2018). Modelos predictivos en Biogeografía: aplicación para la modelización de nichos ecológicos en Geografía Física. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, *78*, 88-126. https://doi.org/10.21138/bage.2395

Gutiérrez Hernández, O., & Gutiérrez-Hernández, O. (2019). *Aproximación multiescalar al estudio biogeográfico de los impactos del cambio global en la ecorregión mediterránea. La Biogeografía en el Antropoceno.* [Universidad de Sevilla]. https://doi.org/https://doi.org/10.5281/zenodo.4755571

Gutiérrez-Hernández, O. (2018). Simulaciones geomáticas para el estudio de la ocupación del suelo: un nuevo giro. *Humanidades y Tecnología. II Seminario de la Facultad de Filosofía y Letras. Universidad de Málaga. 25 y 26 de octubre de 2018. Málaga.*, 18.

Gutiérrez-Hernández, O. (2025). The Baetic-Rifan firs (Abies pinsapo and Abies marocana): geospatial reference data for comparative analysis and conservation of the westernmost circum-Mediterranean firs. *7th International Congress on Biodiversity and Nature Conservation (Conserbio 2025)*.

Gutiérrez-Hernández, O., Cámara-Artigas, R., & García, L. V. (2017). Nicho ecológico y distribución geográfica del pinsapo (Abies pinsapo. Boiss). *Takurunna*, *6-7*, 59-88.

Gutiérrez-Hernández, O., Cámara-Artigas, R., & García, L. V. (2018). Regeneration dynamics of the Baetic Spanish fir forests. Inter-annual and seasonal trends analysis of NDVI. *Pirineos. Revista de Ecología de Montaña*, *173*, e035. https://doi.org/10.3989/ pirineos.2018.173002

Gutiérrez-Hernández, O., & García, L. (2026). Discovering biogeography using GIS and niche modeling: theory and practice for beginners. En *EnviroGIS: Geographic Information Systems in Environmental Analysis*. Elsevier [In press].

Gutiérrez-Hernández, O., & García, L. V. (2021). Seasonal Trend Analysis of MODIS-EVI time series over Europe (2000-2020). *2021 EUROGEO Annual Meeting and Conference, Madrid, 22-23 April 2021*. https://doi.org/http://doi.org/10.5281/zenodo.4716853

Gutiérrez-Hernández, O., & García, L. V. (2024a). Robust Trend Analysis in Environmental Remote Sensing: A Case Study of Cork Oak Forest Decline. *Remote Sensing*, *16*(20), 3886. https://doi.org/10.3390/rs16203886

Gutiérrez-Hernández, O., & García, L. V. (2024b). Trends in Vegetation Seasonality in the Iberian Peninsula: Spatiotemporal Analysis Using AVHRR-NDVI Data (1982–2023). *Sustainability*, *16*(21), 9389. https://doi.org/10.3390/su16219389

Gutiérrez-Hernández, O, & García, L. V. (2025). Distribución y cobertura arbórea de los pinsapares béticos. En *Geografía, realidades y retos de la ciencia del paisaje. Estudios en homenaje a Casildo Ferreras Chasco*. Asociación Española de Geografía. https://doi.org/https://dx.doi.org/10.21138/gf.2025.lc

Gutiérrez-Hernández, Oliver, & García, L. V. (2025a). False discovery rate estimation and control in remote sensing: reliable statistical significance in spatially dependent gridded data. *Remote Sensing Letters*, *16*(5), 537-548. https://doi.org/10.1080/2150704X.2025.2478664

Gutiérrez-Hernández, Oliver, & García, L. V. (2025b). Implementing the Linear Adaptive False Discovery Rate Procedure for Spatiotemporal Trend Testing. *Mathematics*, *13*(22), 3630. https://doi.org/10.3390/math13223630

Gutiérrez-Hernández, Oliver, & García, L. V. (2025c). The ghost of selective inference in spatiotemporal trend analysis. *Science of The Total Environment*, *958*, 177832. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177832

Gutiérrez-Hernández, Oliver, & García, L. V. (2025d). Uncovering True Significant Trends in Global Greening. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 101377. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101377

Gutiérrez-Hernández, O., ;Senciales-González, J., & García, L. V. (2015). Los incendios forestales en Andalucía: investigación exploratoria y modelos explicativos. *Flamma*, *6*(3), 144-148. https://sites.google.com/site/flammafgr/texto/volumen-6-2015/6-3-2015/6-3-10

Gutiérrez-Hernández, O., Senciales-González, J. M., & García, L. V. (2016). Evolución de la Superficie Forestal en Andalucía. Procesos y factores. *Revista de Estudios Andaluces*, *33*(1), 111-148. https://doi.org/10.12795/rea.2016.i33

Harris, R. M. B., Grose, M. R., Lee, G., Bindoff, N. L., Porfirio, L. L., & Fox-Hughes, P. (2014). Climate projections for ecologists. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, *5*(5), 621-637. https://doi.org/10.1002/wcc.291

Helman, D. (2018). Land surface phenology: What do we really 'see' from space? *Science of the Total Environment*, *618*, 665-673. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.237

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, *83*(1-2), 195-213. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2

James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2021). *Multiple Testing* (pp. 553-595). https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1418-1_13

Jefatura del Estado. (2023a). Ley Orgánica 2/2023, de 22 de marzo, del Sistema Universitario. En *Boletín Oficial del Estado (núm. 70): BOE-A-2023-7500*. https://www.boe.es/eli/es/lo/2023/03/22/2/con

Jefatura del Estado. (2023b). Real Decreto 678/2023, de 18 de julio, por el que se regula la acreditación estatal para el acceso a los cuerpos docentes universitarios y el régimen de los concursos de acceso a plazas de dichos cuerpos. En *Boletín Oficial del Estado (núm. 213): BOE-A-2023-19027*. https://www.boe.es/eli/es/rd/2023/07/18/678/con

Jiang, H., & Eastman, J. R. (2000). Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS. *International Journal of Geographical Information Science*. https://doi.org/10.1080/136588100240903

Jones, H. G., & Vaughan, R. A. (2010). *Remote Sensing of Vegetation: Principles, Techniques, and Applications*. OUP Oxford.

Kendall, M. (1975). *Rank Correlation Methods*. Charles Griffin.

Köppen, W. (1918). Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahresablauf (Classification of climates according to temperature, precipitation and seasonal cycle). En *Petermanns geographische Mitteilungen*.

Kovar-Eder, J., Kvaček, Z., Martinetto, E., & Roiron, P. (2006). Late Miocene to Early Pliocene vegetation of southern Europe (7–4Ma) as reflected in the megafossil plant record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, *238*(1-4), 321-339. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2006.03.031

Krosby, M., Tewksbury, J., Haddad, N. M., & Hoekstra, J. (2010). Ecological connectivity for a changing climate. *Conservation Biology*, *24*(6), 1686-1689. https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2010.01585.x

Kuenzer, C., Dech, S., & Wagner, W. (Eds.). (2015a). *Remote Sensing Time Series* (Vol. 22). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-15967-6

Kuenzer, C., Dech, S., & Wagner, W. (2015b). *Remote Sensing Time Series Revealing Land Surface Dynamics: Status Quo and the Pathway Ahead* (pp. 1-24). https://doi.org/10.1007/978-3-319-15967-6_1

Lambin, E. F., Turner, B. L., Geist, H. J., Agbola, S. B., Angelsen, A., Bruce, J. W., Coomes, O. T., Dirzo, R., Fischer, G., Folke, C., George, P. S., Homewood, K., Imbernon, J., Leemans, R., Li, X., Moran, E. F., Mortimore, M., Ramakrishnan, P. S., Richards, J. F., … Xu, J. (2001). The causes of land-use and land-cover change: Moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, *11*(4), 261-269.

Lechuga, V., Carraro, V., Viñegla, B., Carreira, J. A., & Linares, J. C. (2017). Managing drought-sensitive forests under global change. Low competition enhances long-term growth and water uptake in Abies pinsapo. *Forest Ecology and Management*, *406*(June), 72-82. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.10.017

Linares, J. C. (2011). Biogeography and evolution of Abies (Pinaceae) in the Mediterranean Basin: The roles of long-term climatic change and glacial refugia. *Journal of Biogeography*, *38*(4), 619-630. https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02458.x

Lindborg, R., & Eriksson, O. (2004). Historical landscape connectivity affects present plant species diversity. *Ecology*, *85*(7), 1840-1845.

Littlefield, C. E., Krosby, M., Michalak, J. L., & Lawler, J. J. (2019). Connectivity for species on the move: supporting climate-driven range shifts. *Frontiers in Ecology and the Environment*, *17*(5), 270-278. https://doi.org/10.1002/fee.2043

Lobo, J. M., Jiménez-Valverde, A., & Hortal, J. (2010). The uncertain nature of absences and their importance in species distribution modelling. *Ecography*, *33*(1), 103-114. https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2009.06039.x

Loget, N., & Van Den Driessche, J. (2006). On the origin of the Strait of Gibraltar. *Sedimentary Geology*, *188-189*, 341-356. https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2006.03.012

Lomolino, M. V., Riddle, B. A., & Whittaker, R. J. (2016). *Biogeography: Biological Diversity Across Space and Time*. Sinauer Associates. Oxford University Press.

Lonergan, L., & White, N. (1997). Origin of the Betic-Rif mountain belt. *Tectonics*, *16*(3), 504-522. https://doi.org/10.1029/96TC03937

Lü, G., Batty, M., Strobl, J., Lin, H., Zhu, A.-X., & Chen, M. (2019). Reflections and speculations on the progress in Geographic Information Systems (GIS): a geographic perspective. *International Journal of Geographical Information Science*, *33*(2), 346-367. https://doi.org/10.1080/13658816.2018.1533136

Ma, X., Zhu, X., Xie, Q., Jin, J., Zhou, Y., Luo, Y., Liu, Y., Tian, J., & Zhao, Y. (2022). Monitoring nature's calendar from space: Emerging topics in land surface phenology and associated opportunities for science applications. *Global Change Biology*, *28*(24), 7186-7204. https://doi.org/10.1111/gcb.16436

Mai, G., Xie, Y., Jia, X., Lao, N., Rao, J., Zhu, Q., Liu, Z., Chiang, Y.-Y., & Jiao, J. (2025). Towards the next generation of Geospatial Artificial Intelligence. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *136*, 104368. https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104368

Malczewski, J., & Rinner, C. (2015). *Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science*. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74757-4

Maldonado-Briegas, J. J., Sánchez-Hernández, M. I., & Corrales-Vázquez, J. M. (2025). Biosphere Reserves in Spain: A Holistic Commitment to Environmental and Cultural Heritage Within the 2030 Agenda. *Heritage*, *8*(8), 309. https://doi.org/10.3390/heritage8080309

Mann, H. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, *13*, 245–59. https://doi.org/https://doi.org/10.2307/1907187

Martínez-Vega, J., Díaz, A., Nava, J. M., Gallardo, M., & Echavarría, P. (2017). Assessing Land Use-Cover Changes and Modelling Change Scenarios in Two Mountain Spanish National Parks. *Environments*, *4*(4), 79. https://doi.org/10.3390/environments4040079

Mas, J.-F., Nogueira de Vasconcelos, R., & Franca-Rocha, W. (2019). Analysis of High Temporal Resolution Land Use/Land Cover Trajectories. *Land*, *8*(30), 2-19. https://doi.org/10.3390/land8020030

Mc Rae, B., Dickson, B. G., Keitt, T. H., & Shan, V. B. (2008). Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation. *Ecology*, *89*(10), 2712-2724.

Mehring, M., & Stoll-Kleemann, S. (2010). *Principle and practice of the buffer zone in biosphere reserves: from global to local – general perspective from managers versus local perspective from villagers in Central Sulawesi, Indonesia* (pp. 413-429). https://doi.org/10.1007/978-3-642-00493-3_19

Mendoza-Fernández, A. J., Pérez-García, F. J., Martínez-Hernández, F., Salmerón-Sánchez, E., Medina-Cazorla, J. M., Garrido-Becerra, J. A., Martínez-Nieto, M. I., Merlo, M. E., & Mota, J. F. (2015). Areas of endemism and threatened flora in a Mediterranean hotspot: Southern Spain. *Journal for Nature Conservation*, *23*(October), 35-44. https://doi.org/10.1016/j.jnc.2014.08.001

Miller, B. W., Eaton, M. J., Symstad, A. J., Schuurman, G. W., Rangwala, I., & Travis, W. R. (2023). Scenario-Based Decision Analysis: Integrated scenario planning and structured decision making for resource management under climate change. *Biological Conservation*, *286*, 110275. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2023.110275

Mod, H. K., Scherrer, D., Luoto, M., & Guisan, A. (2016). What we use is not what we know: Environmental predictors in plant distribution models. *Journal of Vegetation Science*, *27*(6), 1308-1322. https://doi.org/10.1111/jvs.12444

Musikhin, I., & Karpik, A. (2023). Use of GIS technology and cellular automata for modeling multiple socio-economic scenarios of regional spatial development and inter-regional cooperation. *Geo-spatial Information Science*, *26*(1), 71-93. https://doi.org/10.1080/10095020.2023.2182237

Naimi, B., & Araújo, M. B. (2016). sdm: a reproducible and extensible R platform for species distribution modelling. *Ecography*, *39*(4), 368-375. https://doi.org/10.1111/ecog.01881

Naimi, B., Ebrahimi, E., & Araújo, M. B. (2026). The sdm R Package for Species Distribution Modeling. En *Boletín oficial del Estado: BOE-A-2010-17372* (pp. 11-66). https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2010-17372

Navarro-Cerrillo, R., Camarero, J., Manzanedo, R., Sánchez-Cuesta, R., Lopez Quintanilla, J., & Sánchez Salguero, R. (2014). Regeneration of Abies pinsapo within gaps created by Heterobasidion annosum-induced tree mortality in southern Spain. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, *7*(4), 209-215. https://doi.org/10.3832/ifor0961-007

Navarro-Cerrillo, R. M., González-Moreno, P., Ruiz-Gómez, F. J., Sánchez-Cuesta, R., Gazol, A., & Camarero, J. J. (2022). Drought stress and pests increase defoliation and mortality rates in vulnerable Abies pinsapo forests. *Forest Ecology and Management*, *504*, 119824. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119824

Neeti, N., & Eastman, J. R. (2011). A Contextual Mann-Kendall Approach for the Assessment of Trend Significance in Image Time Series. *Transactions in GIS*, *15*(5), 599-611. https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2011.01280.x

Ortega-Rubio, A. (Ed.). (2020). *Socio-ecological Studies in Natural Protected Areas*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47264-1

Ortega-Rubio, A., Olmos-Martínez, E., & Blázquez, M. C. (2021). Socioecology and Biodiversity Conservation. *Diversity*, *13*(9), 442. https://doi.org/10.3390/d13090442

Paegelow, M. (2018). *Multi Criteria Evaluation (MCE)* (pp. 447-449). https://doi.org/10.1007/978-3-319-60801-3_26

Peterson, A. T., Papeş, M., & Soberón, J. (2015). Mechanistic and Correlative Models of Ecological Niches. *European Journal of Ecology*, *1*(2), 28-38. https://doi.org/10.1515/eje-2015-0014

Peterson, A. T., Soberón, J., Pearson, R. G., Anderson, R. P., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M., & Bastos Araújo, M. (2011). *Ecological niches and geographic distributions* (Vol. 49, Número 11). Princeton University Press.

Price, M. (1996). Biosphere reserves: A flexible framework for regional cooperation in an era of change. En *Human Ecology And Climate Change*. Taylor & Francis.

Quirós Hernández, M. (2011). *Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) cartografía, fotointerpretación, teledetección y SIG*. Universidad de Salamanca.

Randin, C. F., Ashcroft, M. B., Bolliger, J., Cavender-Bares, J., Coops, N. C., Dullinger, S., Dirnböck, T., Eckert, S., Ellis, E., Fernández, N., Giuliani, G., Guisan, A., Jetz, W., Joost, S., Karger, D., Lembrechts, J., Lenoir, J., Luoto, M., Morin, X., … Payne, D. (2020). Monitoring biodiversity in the Anthropocene using remote sensing in

species distribution models. *Remote Sensing of Environment*, *239*(March), 111626. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111626

Reed, B. C., Schwartz, M. D., & Xiao, X. (2009). Remote sensing phenology. *Phenology of Ecosystem Processes*, 231-246. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0026-5_10

Rodríguez-Sánchez, F., Pérez-Barrales, R., Ojeda, F., Vargas, P., & Arroyo, J. (2008). The Strait of Gibraltar as a melting pot for plant biodiversity. *Quaternary Science Reviews*, *27*(23-24), 2100-2117. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.08.006

Rouse, J., Haas, R., & Schell, J. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. *Texas A & M University*, 1-8.

Rubio Recio, J. M. (1989). *Biogeografía. Paisajes vegetales y vida animal*. Síntesis.

Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, *48*(1), 9-26. https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I

Saaty, T. L. (2013). The Modern Science of Multicriteria Decision Making and Its Practical Applications: The AHP/ANP Approach. *Operations Research*, *61*(5), 1101-1118. https://doi.org/10.1287/opre.2013.1197

Sandström, C., Mancheva, I., & Laudon, H. (2025). Unlocking the potential of biosphere reserves: a review of structural, institutional, and ideational challenges to transformational learning. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, *75*, 101543. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2025.101543

Sanguet, A., Wyler, N., Petitpierre, B., Honeck, E., Poussin, C., Martin, P., & Lehmann, A. (2022). Beyond topo-climatic predictors: Does habitats distribution and remote sensing information improve predictions of species distribution models? *Global Ecology and Conservation*, *39*, e02286. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2022.e02286

Schwartz, M. D. (2013). Phenology: An Integrative Environmental Science. En M. D. Schwartz (Ed.), *Phenology: An Integrative Environmental Science*. Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6925-0

Schwartz-Belkin, I., & Portman, M. E. (2023). A review of geospatial technologies for improving Marine Spatial Planning: Challenges and opportunities. *Ocean & Coastal Management*, *231*, 106280. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106280

Seijo, F., Linares, J. C., Sánchez-Salguero, R., Taiqui, L., & Zavala, M. A. (2023). Cultural dimensions of forest conservation under global change: the case of relict Mediterranean fir forests. *Landscape Ecology*, *38*(12), 3675-3694. https://doi.org/10.1007/s10980-023-01750-7

Semerikova, S. A., Khrunyk, Y. Y., Lascoux, M., & Semerikov, V. L. (2018). From America to Eurasia: a multigenomes history of the genus Abies. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, *125*, 14-28. https://doi.org/10.1016/j.ympev.2018.03.009

Sen, P. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal ofthe American Statistical Association*, *63*, 1379–89. https://doi.org/https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934

Serpelloni, E., Vannucci, G., Pondrelli, S., Argnani, A., Casula, G., Anzidei, M., Baldi, P., & Gasperini, P. (2007). Kinematics of the Western Africa-Eurasia plate boundary from focal mechanisms and GPS data. *Geophysical Journal International*, *169*(3), 1180-1200. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03367.x

Shaffer, J. P. (1995). Multiple Hypothesis Testing. *Annual Review of Psychology*, *46*(1), 561-584. https://doi.org/10.1146/annurev.ps.46.020195.003021

Soberón, J. (2007). Grinnellian and Eltonian niches and geographic distributions of species. *Ecology Letters*, *10*(12), 1115-1123. https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01107.x

Soberon, J., & Arroyo-Peña, B. (2017). Are fundamental niches larger than the realized? Testing a 50-year-old prediction by Hutchinson. *PLoS ONE*, *12*(4), 1-14. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175138

Soberón, J., Osorio-Olvera, L., & Peterson, T. (2017). Diferencias conceptuales entre modelación de nichos y modelación de áreas de distribución. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, *88*(2), 437-441. https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.03.011

Soberon, J., & Peterson, A. T. (2005). Interpretation of Models of Fundamental Ecological Niches and Species' Distributional Areas. *Biodiversity Informatics*, *2*(0), 1-10. https://doi.org/10.17161/bi.v2i0.4

Store, R., & Kangas, J. (2001). Integrating spatial multi-criteria evaluation and expert knowledge for GIS-based habitat suitability modelling. *Landscape and Urban Planning*, *55*(2), 79-93. https://doi.org/10.1016/S0169-2046(01)00120-7

Streiner, D. L., & Norman, G. R. (2011). Correction for multiple testing: Is there a resolution? *Chest*, *140*(1), 16-18. https://doi.org/10.1378/chest.11-0523

Suc, J. (1984). Origin and evolution of the Mediterranean vegetation and climate in Europe. *Nature*, *307*(5950), 429-432. https://doi.org/10.1038/307429a0

Tapia, J. F. D., Promentilla, M. A. B., & Smarandache, F. (2023). Addressing Uncertainties in Planning Sustainable Systems Through Multi-criteria Decision Analysis (MCDA). *Process Integration and Optimization for Sustainability*, *7*(3), 473-474. https://doi.org/10.1007/s41660-023-00317-y

Terrab, A., Talavera, S., Arista, M., Paun, O., Stuessy, T. F., & Tremetsberger, K. (2007). Genetic diversity at chloroplast microsatellites (cpSSRs) and geographic structure in endangered West Mediterranean firs (*Abies* spp., Pinaceae). *TAXON*, *56*(2), 409-416. https://doi.org/10.1002/tax.562012

Theil, H. (1950). A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis I, II and III. En *Proceedings of the Section of Sciences, Koninklijke Academie van Wetenschappen te* (pp. 386–92). https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-011-2546-8_20

Trabut, L. (1906). Sur la présence d'un *Abies* nouveau au Maroc (*Abies marocana*). *Bulletin de la Société Botanique de France*, *53*(2), 154-155. https://doi.org/10.1080/00378941.1906.10831158

Trabut, L. (1928). Le Sapin du Maroc. *Abies maroccana* Trab. (Soc. bot. Fr., 1906). *Bulletin de la Société Botanique de France*, *75*(5), 897-902. https://doi.org/10.1080/00378941.1928.10837111

Turner, M. G. (1989). Landscape Ecology: The Effect of Pattern on Process. *Annual Review of Ecology and Systematics*, *20*(1), 171-197. https://doi.org/10.1146/annurev.es.20.110189.001131

UNESCO. (1996). *Biosphere reserves: the Seville Strategy and the statutory framework of the world network*.

UNESCO. (2006). *Intercontinental BR of the Mediterranean*. https://www.unesco.org/en/mab/intercontinental-br-mediterranean-0

UNESCO. (2017). *A new roadmap for the man and biosphere (MAB) programme and its world network of biosphere reserves. MAB strategy (2015–2025), Lima action plan (2016–2025). Lima Declaration*. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247418

UNESCO. (2022). *Technical guidelines for biosphere reserves*. https://en.unesco.org/mab

UNESCO. (2024). *Designation and review process*. https://www.unesco.org/en/mab/wnbr/designation?hub=66369

Universidad de Málaga. (2025). Resolución de 19 de septiembre de 2025, de la Universidad de Málaga, por la que se convoca concurso de acceso a plazas de cuerpos docentes universitarios. En *Boletín Oficial del Estado* (Vol. 234). https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2025-19255

Urban, D., & Timothy, K. (2001). Landscape Connectivity: A Graph-Theoretic Perspective. *Ecology*, *82*(5), 1205-1218.

Van Cuong, C., Dart, P., & Hockings, M. (2017). Biosphere reserves: Attributes for success. *Journal of Environmental Management*, *188*, 9-17. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.069

Warren, D. L., Beaumont, L. J., Dinnage, R., & Baumgartner, J. B. (2019). New methods for measuring ENM breadth and overlap in environmental space. *Ecography*, *42*(3), 444-446. https://doi.org/10.1111/ecog.03900

Willis, K. J., & Niklas, K. J. (2004). The role of Quaternary environmental change in plant macroevolution: the exception or the rule? *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, *359*(1442), 159-172. https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1387

Wulder, M. A., Roy, D. P., Radeloff, V. C., Loveland, T. R., Anderson, M. C., Johnson, D. M., Healey, S., Zhu, Z., Scambos, T. A., Pahlevan, N., Hansen, M., Gorelick, N., Crawford, C. J., Masek, J. G., Hermosilla, T., White, J. C., Belward, A. S., Schaaf, C., Woodcock, C. E., … Cook, B. D. (2022). Fifty years of Landsat science and impacts. *Remote Sensing of Environment*, *280*, 113195. https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113195

Xiang, Q., Wei, R., Zhu, Y., Harris, A., & Zhang, X. (2018). New infrageneric classification of *Abies* in light of molecular phylogeny and high diversity in western North America. *Journal of Systematics and Evolution*, *56*(5), 562-572. https://doi.org/10.1111/jse.12458

Xiang, Q., Yang, J., Gernandt, D. S., Ye, T., Yang, L., Pan, J., Xiang, R., Zhao, C., Nakamura, K., Zhang, X., Liu, Y., & Wei, R. (2025). Ecological and Evolutionary Factors Contribute to the Uneven Diversification of Firs in the Northern Hemisphere. *Journal of Biogeography*, *52*(2), 505-519. https://doi.org/10.1111/jbi.15055

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

Zhu, W. (2021). Remote sensing statistical inference: basic theory and forward simulation of water–air statistical radiative transfer. *Earth Science Informatics*, *14*(4), 2145-2159. https://doi.org/10.1007/s12145-021-00661-y