



Interreg
POCTEFA



Gestión para la adaptación de los bosques pirenaicos al cambio climático

Fichas-Resumen de resultados, herramientas y líneas de trabajo en curso en el macizo Pirenaico





<http://es.acclimafor.net>

Socios del proyecto:



Cofinanciadores:



Edita:

Centro de la Propiedad Forestal
Torreferrussa
Carretera de Sabadell a Santa Perpètua, km. 4,5
Apartado de Correos 240, 08130 Santa Perpètua de Mogoda
Tel.: 93 574 70 39
Correo electrónico: cpf@gencat.cat
Sitio web: www.cpf.gencat.cat

Diseño y maquetación: Elizabeth Fernández (Centro de la Propiedad Forestal)

Proyecto cofinanciado al 65% por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del programa INTERREG V-A España-Francia-Andorra.

ÍNDICE

1. Introducción: Necesidades y fuentes de información actuales

- 1.1 Necesidades de información: A qué retos se enfrentan los gestores forestales del pirineo ante el cambio climático ? 1
- 1.2 Fuentes de información: Redes y proyectos sobre bosques y cambio climático con incidencia en los bosques pirenaicos 5

2. Indicadores y evidencias del cambio climático en los bosques pirenaicos

- 2.0 Indicadores forestales del cambio climático en los pirineos..... 8
- 2.1 Evolución de la fenología de las especies arbóreas pirenaicas..... 11
- 2.2 Evolución del estado sanitario de los bosques pirenaicos..... 17
- 2.3 Evolución de la composición florística de los bosques pirenaicos 21
- 2.4 Uso de la teledetección como herramienta de seguimiento de los efectos del cambio climático en los bosques pirenaicos 27
- 2.5 Ejemplo de uso de teledetección en Navarra: seguimiento fenológico de cuatro especies forestales..... 28
- 2.6 Ejemplo de uso de teledetección en Cataluña: seguimiento de la vigorosidad de la vegetación (NDVI)..... 35
- 2.7 Ejemplo de uso de la teledetección en el País Vasco: Seguimiento de la defoliación en pinares 40

3. Capacidad adaptativa y cambios en la distribución de especies

- 3.0 Cambios en la distribución de especies y capacidad de adaptación. Información y herramientas disponibles 45
- 3.1 Pino silvestre: Autoecología y compatibilidad climática actual y futura. Problemas de regeneración..... 47
- 3.2 El pino silvestre (*Pinus sylvestris*) en el País Vasco: Autoecología amenazas y estrategias de adaptación 54
- 3.3 Pino silvestre (*Pinus sylvestris*) en Navarra: Autoecología, amenazas y estrategias de gestión..... 58
- 3.4 El pino silvestre en Cataluña: Autoecología, amenazas y estrategias de adaptación aplicadas 60

4. Silvicultura adaptativa

- 4.1 Estrategias de adaptación al cambio climático aplicadas a los bosques pirenaicos 67
- 4.2 Plantaciones demostrativas para la adaptación al cambio climático..... 73

NECESIDADES DE INFORMACIÓN:

¿A QUÉ RETOS SE ENFRENTAN LOS GESTORES FORESTALES DEL PIRINEO ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO?



Interreg
POCTEFA



El segundo *Informe sobre el Cambio Climático en los Pirineos* (OPCC, 2020) recoge las últimas proyecciones climáticas realizadas en el marco del proyecto CLIMPY. Todos los modelos corroboran un **aumento significativo de las temperaturas máximas y mínimas diarias en todas las estaciones del año y en toda la zona pirenaica** de manera progresiva a lo largo del siglo XXI. Para el horizonte 2030, el aumento del **valor medio anual de las temperaturas máximas** respecto al periodo de referencia (1961-1990) se sitúa, de media para el Pirineo, entre 1°C y 2,7°C. Por el contrario, **en relación con la precipitación, no se proyectan cambios significativos.**

Los cambios de temperatura esperados tienen consecuencias sobre los bosques, que ya se empiezan a observar, entre las cuales destacan las siguientes:

- Modificación de la diversidad y la distribución de varias comunidades vegetales y especies forestales.

- Efectos en la productividad de los bosques y en su capacidad de fijar el CO₂ atmosférico a través de la fotosíntesis.
- Alteración de las condiciones de salud de los bosques y posible desequilibrio con los agentes patógenos.
- Menor capacidad de los bosques para protegerlos de algunos riesgos naturales.
- Incremento del número e intensidad de los incendios forestales en los Pirineos.

Ante esta situación y la **incertidumbre** que lleva asociada, **¿qué necesidades de información tienen los gestores forestales que deben tomar decisiones, hoy, sobre la gestión de los bosques pirenaicos del mañana?**



Principales retos identificados por los gestores forestales del Pirineo en relación con el cambio climático

Para responder en concreto a esta cuestión, en el marco del proyecto ACCLIMAFOR, las 7 organizaciones socias del proyecto (CTFC, CPF, GAN-NIK, HAZI Fundazioa, CNPF, ONF, FORESPIR) decidieron orientar mejor las líneas de trabajo y transferencia del proyecto, complementado el trabajo propio con una consulta dirigida a un grupo de gestores y técnicos, públicos y privados, que trabajan diariamente en la gestión de los montes pirenaicos de las regiones participantes en el proyecto (Navarra, País Vasco, Cataluña, Aragón y Occitania).

Para ello, se realizó una encuesta con la siguiente pregunta abierta: "Si el proyecto tuviera que contestar a 2 preguntas esenciales en relación con la gestión forestal y la adaptación al cambio climático, ¿cuáles querrías que fueran?".

Se obtuvieron respuestas adicionales de 16 gestores del Pirineo, 8 de España y 8 de Francia, identificando estos retos y necesidades esenciales, que hemos clasificado en 3 grandes grupos de demanda de información:

1. Impactos concretos del cambio climático sobre los bosques pirenaicos.
2. Capacidad de adaptación de las diferentes especies arbóreas.
3. Silvicultura adaptativa y otras medidas de adaptación.

1. Impactos y evidencias del cambio climático en los bosques pirenaicos

La necesidad de disponer de datos concretos sobre los bosques del Pirineo fue una de las preocupaciones mencionadas como prioritaria por un mayor número de gestores, lo que indica una necesidad de comunicar mejor los siguientes aspectos para los cuales ya existe una amplia información disponible:

- Las proyecciones regionalizadas y herramientas de modelización desarrolladas.

- Las conclusiones del seguimiento de datos e indicadores existentes, tales como las series de fenología o las redes de seguimiento de daños.
- Los potenciales impactos combinados entre perturbaciones.

Ejemplo de preguntas recibidas:

- ¿Qué datos concretos y reales conocemos sobre el impacto del cambio climático en los Pirineos?
- Mejor conocimiento de los impactos sobre las diferentes especies presentes en el Pirineo.
- Cambio climático y expansión de plagas forestales en el Pirineo.

2. Capacidad adaptativa y cambios en la distribución de las especies arbóreas. ¿Qué especies promover?

En este tema, las demandas se orientan hacia la capacidad de resiliencia de los bosques por sí mismos y se visualiza una de las principales dificultades del gestor forestal: ¿Qué especie promocionar? Para contestar a esta pregunta, se requieren conocimientos ligados a:

- La autoecología de especies y sus límites ecológicos (pluviometría, temperatura...).
- Los cambios proyectados en la distribución de las especies y nuevas formaciones climáticas.
- La posibilidad de sustitución de especies por otras económicamente equivalentes en las nuevas condiciones.
- La introducción de especies autóctonas vs especies alóctonas (temporal o geográficamente).

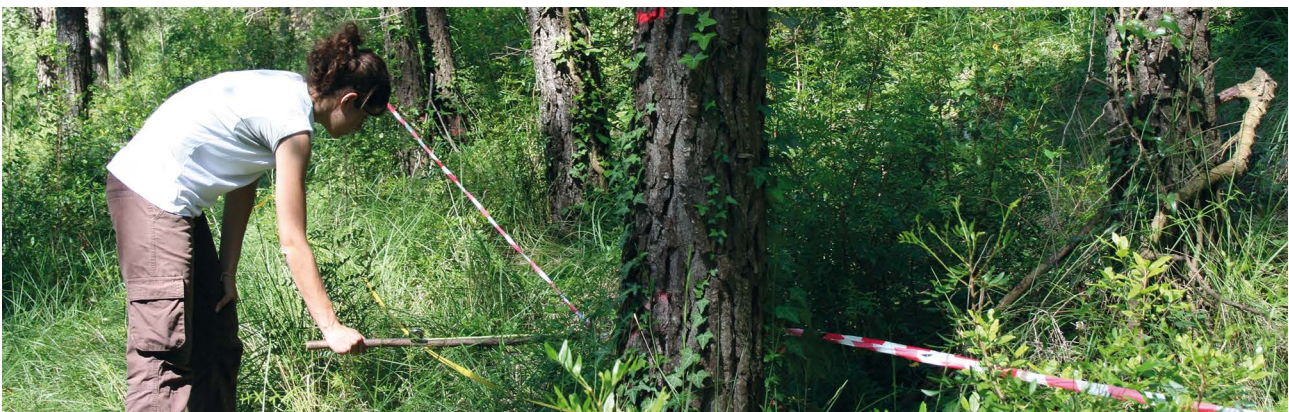
Ejemplo de preguntas recibidas:

- ¿Cuál es la capacidad genética de los rodales naturales hoy en día para resistir los peores escenarios de cambio climático?.
- ¿Cuál sería la distribución o cambio de distribución esperado para las especies o formaciones forestales?.
- ¿Qué información y criterios debo considerar para recomendar el establecimiento de una especie en particular (más adaptada al cambio climático)?.
- ¿Qué comunidades damos por "climáticas" ante una perturbación que nos altere las formaciones forestales existentes? Se expone el ejemplo de grandes incendios ocurridos cerca del Pirineo en la década de los 90, donde la regeneración del arbolado ha sido muy escasa en las peores calidades de estación, siendo sustituida por formaciones más parecidas a brollas, o maquias.
- ¿Realmente tenemos que limitarnos a especies consideradas hoy como autóctonas o podemos mirar hacia otras especies que pudieran haber estado presentes en los Pirineos a escala geológica?.
- ¿Debemos tomar los incendios y otras perturbaciones como oportunidad de adaptación al cambio climático?.
- Impactos y dinámicas observadas en pino silvestre. ¿Qué especie puede sustituirlo sin perder rendimiento económico en las explotaciones forestales? Buscar alternativas económicamente rentables en base a nuevos usos para las especies sucesoras.
- ¿Influyen las micorrizas en la capacidad de adaptación de los ecosistemas forestales?.

3. Silvicultura adaptativa y otras medidas de adaptación

Este grupo es el que reúne mayor diversidad en los retos considerados como prioritarios por las personas gestoras de los bosques del Pirineo. Es decir, cada uno de los temas ha sido mencionado como prioritario (sólo podían indicar 2 temas que considerasen esenciales) por una sola persona, lo que indica la alta dependencia del contexto de las estrategias silvícolas de adaptación y la importancia de compartir los ejemplos de medidas aplicadas en los diferentes ambientes que conforman el macizo pirenaico. En general, se pueden resumir en:

- Cambios que introducir en las prácticas silvícolas habituales.
- Medidas para acompañar la auto adaptación de los bosques.
- Gestión forestal preventiva frente a mayores perturbaciones (incendios, plagas, avenidas) y sus efectos combinados, entre ellas y con otras amenazas.
- Financiación de la silvicultura adaptativa. Cuantificación de costes y riesgos.



Ejemplo de preguntas recibidas:

- ¿Cómo se pueden gestionar nuestros bosques para favorecer la sucesión natural de las especies adaptadas al cambio climático (ayudar al cambio de acuerdo con la sucesión natural para evitar altos costes económicos)?.
- Acompañamiento de las masas actuales a la adaptación al cambio (modelos de gestión y actuaciones complementarias de apoyo).
- ¿Qué medidas de gestión forestal pueden ayudar a minimizar los efectos de la sequía?.
- Impacto de la gestión (elecciones silvícolas, trabajos, métodos de explotación) sobre el cambio climático.
- Revitalizar nuestros rodales aplicando un manejo básico (aclareo, mejora y regeneración natural tan pronto como las parcelas lo permitan). Una población dinámica y sana resistirá mejor las limitaciones que puedan surgir.
- Hay una permanente tensión entre la actividad agrícola y ganadera, que interesa para mantener el medio rural, el mosaico que genera, los sistemas silvopastorales, etc. y la gestión conservacionista. Sería interesante incluir y promover otras actividades del mundo rural como respuesta al cambio climático.
- En los Pirineos, el impacto de los ungulados salvajes en la regeneración del arbolado es un factor que agrava las consecuencias del cambio climático. ¿Cómo limitarlo?.
- ¿Cómo se hará el reparto de agua dulce entre un entorno de montaña todavía con lluvias, a priori y la llanura, donde la disponibilidad de agua será crónicamente insuficiente?.
- Atendiendo a los frecuentes episodios de lluvia intensa, ¿se puede llevar a cabo algún tipo de actuación silvícola para poder disminuir o minimizar las afectaciones por avenidas?.
- Cuantificación de los costes y riesgos de fracaso de las diferentes estrategias de adaptación (plantación de nuevas especies, irregularización).
- Financiación de la gestión y actuaciones.

Para más información

OPCC 2020. Resumen ejecutivo del informe *El cambio climático en los Pirineos: impactos, vulnerabilidades y adaptación. Bases de conocimiento para la fu-*

tura estrategia de adaptación al cambio climático en los Pirineos. <https://www.opcc-ctp.org/sites/default/files/editor/opcc-resumen-es.pdf>.



FUENTES DE INFORMACIÓN:

REDES Y PROYECTOS SOBRE BOSQUES Y CAMBIO CLIMÁTICO CON INCIDENCIA EN LOS BOSQUES PIRENAICOS



Interreg
POCTEFA



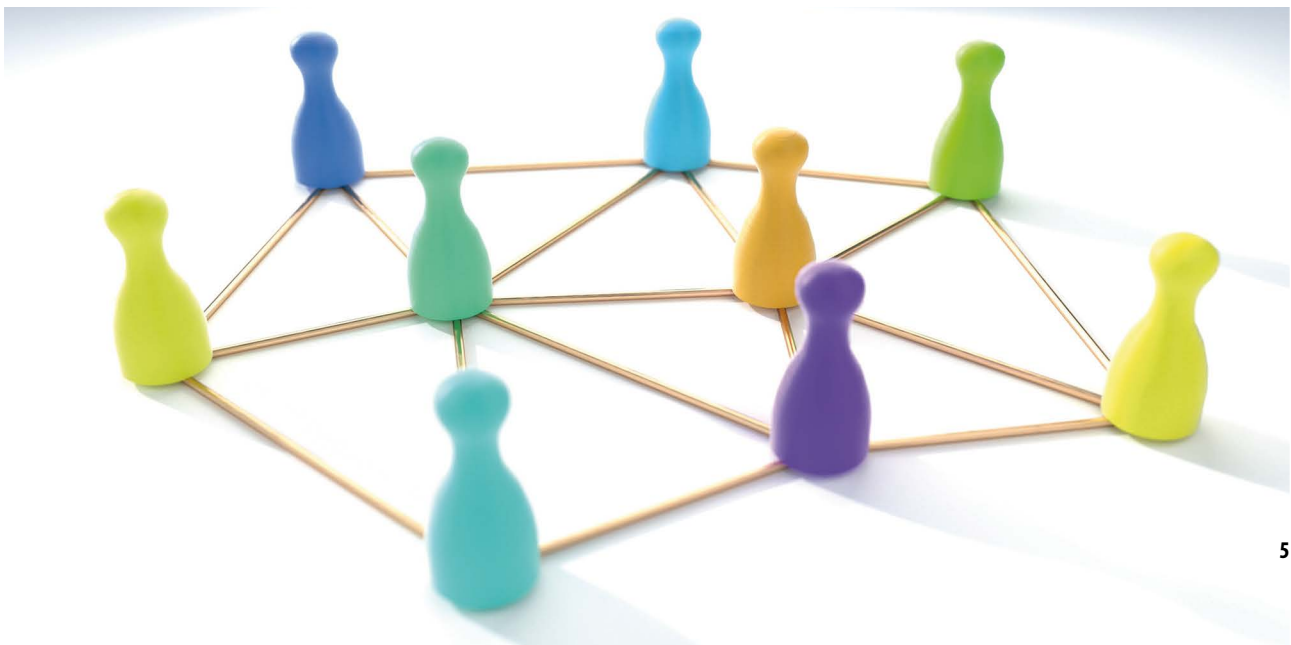
En colaboración con el **Observatorio Pirenaico del Cambio Climático** (OPCC), los proyectos **POCC1**, **CANOPEE**, los posteriores proyectos **ACCLIMAFOR** y **ADAPYR** (2019-2022) constituyen la principal red transfronteriza de seguimiento del cambio climático en los bosques pirenaicos. No obstante, a ambos lados de la cordillera, existen diversas redes de referencia y proyectos que permiten comprender mejor la magnitud del cambio climático o ensayar estrategias de gestión forestal adaptativa que son también de interés para los bosques pirenaicos.

Uno de los objetivos del proyecto ACCLIMAFOR ha sido facilitar la transferencia activa del amplio conocimiento existente sobre los impactos del cambio climático en los bosques y la gestión forestal adaptativa entre los diferentes actores de la gestión forestal en el Pirineo. Para ello, los socios del proyecto han identificado las principales redes y proyectos que están trabajando en bosques y cambio climático a

ambos lados del macizo y se ha estructurado la información para facilitar su consulta, disponible en la página web de FORESPIR y OPCC.

Esta acción, junto con la identificación de las necesidades de los gestores forestales, ha permitido detectar las lagunas de conocimiento que deben abordarse en nuevos proyectos compartidos. También ha facilitado el intercambio de conocimientos y material divulgativo entre proyectos y su posterior transferencia en cascada a los actores forestales de los diferentes territorios.

Finalmente, se ha elaborado un documento práctico con información actualizada generada en el marco de los proyectos CANOPEE y ACCLIMAFOR. Se presentan en formato de ficha-resumen los diferentes aspectos de seguimiento y gestión adaptativa trabajados en ambos proyectos.



Principales redes y proyectos identificados por los socios del proyecto ACCLIMAFOR sobre gestión forestal y adaptación al cambio climático, de interés para los bosques pirenaicos



Contenidos de la guía práctica de gestión adaptativa del proyecto ACCLIMAFOR

La guía práctica elaborada en el marco del proyecto POCTEFA ACCLIMAFOR, pretende dar una respuesta operativa a los 3 grandes retos planteados al proyecto por los gestores pirenaicos. Para ello, se ha organizado la información elaborada en los proyectos CANOPEE y ACCLIMAFOR en un formato práctico, y se ha completado con otra información relevante, elaborada por los distintos socios del proyecto.

Contenidos de la guía práctica ACCLIMAFOR

- **Indicadores y evidencias del cambio climático en los bosques pirenaicos**

Se presentan las primeras conclusiones del análisis de las parcelas de seguimiento de fenología, defoliación y composición florística llevado a cabo en la última década en el marco de los proyectos OPCC-1, CANOPEE (2016-2018) y ACCLIMAFOR (2019-2022), de forma conjunta para todo el macizo pirenaico.

Se aborda el uso de la teledetección para el seguimiento de los cambios en la fenología y en el estado sanitario/vitalidad de las masas forestales, como complemento a la información de la redes de parcelas, con algunos ejemplos de uso en el trabajo diario de gestores forestales pirenaicos.

- **Capacidad adaptativa y cambios en la distribución de las especies arbóreas. El caso del pino silvestre**

Se ofrece un resumen de las herramientas cartográficas existentes a ambos lados del pirineo para conocer el impacto del cambio climático en la distribución y vulnerabilidad de las diferentes especies, así como otra información relevante disponible.

Se toma como ejemplo el caso del pino silvestre (*Pinus sylvestris*) y se ilustra con algunas de las estrategias que los gestores forestales están ya implementando para hacer frente a los diferentes retos a los que se enfrenta esta especie en las distintas regiones.

- **Silvicultura adaptativa**

Por un lado, se resumen las estrategias silvícolas de adaptación desarrolladas en detalle en la guía CANOPEE, y por otro, se aborda el tema de las plantaciones forestales en el contexto del cambio climático, incorporando el nuevo conocimiento generado por los socios del proyecto ACCLIMAFOR en los últimos 3 años. Ambos aspectos se ilustran con ejemplos de las nuevas actuaciones incorporadas en la red de parcelas experimentales y demostrativas establecida por los socios del proyecto desde 2016.

Para más información

Ubicación del repositorio de proyectos:
<https://es.forespir.com/>, o
<https://www.opcc-ctp.org/es/sector/bosques>.

Página web del proyecto Acclimafor:
<https://www.opcc-ctp.org/es/proyecto/acclimafor>.





INDICADORES FORESTALES DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS PIRINEOS



El cambio climático sigue su curso, como lo demuestran los diversos informes de síntesis del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) que se suceden y cada vez aportan más evidencias.

El sexto informe se publicó recientemente y confirma una vez más los peores temores de los informes anteriores. Si bien las proyecciones climáticas futuras siguen sujetas a discusiones y suposiciones basadas en escenarios de emisiones pasadas ya son

perceptibles tanto en el propio clima como en los ecosistemas naturales.

Sin embargo, el propio IPCC insiste en que la intensidad de los efectos no se percibe de la misma manera en todas las partes del planeta y en que determinados ecosistemas o áreas de actividad son susceptibles de verse más afectados que otros. En consecuencia, se hace evidente la necesidad de un control de los ecosistemas adaptado a los retos de cada territorio.



El Observatorio Pirenaico del Cambio Climático

El Observatorio Pirenaico del Cambio Climático (OPCC) es una iniciativa de cooperación transfronteriza entre Francia, España y Andorra, que la Comunidad de Trabajo de los Pirineos puso en marcha en 2010.

Su objetivo es contribuir al seguimiento y entendimiento del cambio climático en los Pirineos para ayudar a los territorios a adaptarse a sus efectos. Constituye así una plataforma de referencia en términos de conocimientos (series temporales climáticas), pero también de iniciativas de adaptación tanto de los ecosistemas (glaciares, flora, fauna, bosques,

etc.) como de las actividades de montaña (turismo, agropastoralismo, etc.).

En lo que respecta más específicamente al bosque (59% de la superficie del macizo pirenaico), varios proyectos, apoyados, entre otros, por el Fondo Europeo de Desarrollo POCTEFA, el Estado francés y las regiones de Occitania y Nueva Aquitania, han permitido comprender mejor los fenómenos actuales. Coordinados por GEIE FORESPIR y organizados alrededor de los profesionales forestales de cada territorio, los programas OPCC, luego CANOPEE y hoy ACCLIMAFOR se han sucedido en los últimos 10 años.

Indicadores

Hemos visto que garantizar un seguimiento adecuado de los fenómenos actuales es esencial para anticipar y adaptar al máximo nuestras medidas de gestión silvícola a los efectos observados. Por lo tanto, la elección de los indicadores es un paso esencial porque constituye un compromiso entre varios criterios, a veces antagónicos.

- Variable fuertemente (o incluso únicamente) vinculada al fenómeno observado.
- Respuesta rápida para anticipar agravamientos.
- Enfoque sobre los daños predecibles.

Por eso es necesario tener una idea de los riesgos presentes tanto para los ecosistemas como para la actividad económica vinculada a estos, pero también una buena percepción de las interacciones entre los fenómenos combinados.

En el marco del OPCC, nuestra elección recayó en tres indicadores:

Evolución fenológica

- ¿Se observa un desfase fenológico en el estrato arbóreo (en hayas, abetos pectinados, pinos silvestres, pinos negros, pinos negrales o incluso robles albares)?
- Se puede diferenciar este desfase fenológico de los árboles según la especie, la altitud, la orientación o incluso el desnivel mediterráneo-atlántico?

Indicador a **corto plazo**.

Solo depende de las condiciones climáticas

Se trata de ver la realidad y la importancia del cambio actual.

Evolución de las patologías y las debilidades

- ¿Se observa un deterioro del estado de salud de los árboles a lo largo del tiempo en las principales especies representativas del macizo?
- ¿Se puede diferenciar entre un deterioro del estado de salud de los árboles según la especie, la altitud, la orientación o incluso el desnivel mediterráneo-atlántico?

Indicador a **medio plazo**.

Multifactorial

Se trata de percibir la intensidad de los daños que afectan a los árboles.

Evolución de las zonas de distribución de las especies

- ¿Se observa un repunte en la altitud, cambios de orientación o una progresión/regresión hacia el oeste de las especies arbóreas o las especies herbáceas forestales?

Indicador a **largo plazo**.

Multifactorial, incluido el factor antrópico.

Se trata de comprender las modificaciones de los ecosistemas.

Para cada uno de estos indicadores, existen bases de datos que se han recopilado, analizado y en ocasiones complementado para reflejar mejor la variabilidad de los ecosistemas pirenaicos.

Primeros 10 años de resultados de la red de vigilancia de los Pirineos

Se han implementado tres indicadores de control del cambio climático desde 2013. Dos son representativos de las dos vertientes de los Pirineos. Su objetivo es medir periódicamente lo siguiente:

- **La evolución fenológica** de las principales especies forestales de los Pirineos. Anualmente, se controlan **63 parcelas, repartidas por la cordillera pirenaica**.
- **La evolución de las patologías y las debilidades**, a través del análisis de la tasa de defoliación de las parcelas supervisadas en el marco de la

Red Europea de Seguimiento de los Ecosistemas Forestales.

- Finalmente, también se analiza la **evolución de los cortejos florísticos**, con el fin de detectar posibles cambios en la distribución de especies a escala del macizo.

Los resultados del seguimiento de estos 3 indicadores para los bosques pirenaicos durante los últimos 10 años, efectuados por la ONF en el marco de los proyectos CANOPEE y ACCLIMAFOR, se detallan en las fichas 2.1, 2.2 y 2.3, respectivamente.





EVOLUCIÓN DE LA FENOLOGÍA DE LAS ESPECIES ARBÓREAS PIRENAICAS



La fenología trata la sucesión de eventos biológicos de las especies a lo largo del año. En el caso de las plantas, la siguiente tabla muestra las principales fases fenológicas consideradas. Este ciclo anual está determinado, en parte, por factores internos (como los genes y las hormonas), pero para la mayoría de las especies templadas, los factores determinantes son los factores ambientales y meteorológicos. Por

ello, estas fases fenológicas constituyen un indicador fiable y de respuesta rápida para detectar los primeros signos de los efectos del cambio climático.

Los determinismos funcionales y la facilidad de observación nos llevaron a seleccionar únicamente **la brotación (o desborre) como indicador más relevante**.

	Factores determinantes	Facilidad de observación
Brotación (desborre)	Principalmente la temperatura.	Fácil para los árboles de hoja caduca; más complejo para los de hoja perenne.
Floración	Principalmente la temperatura.	Flores de especies forestales a veces poco llamativas.
Fructificación	Temperatura i suministro de agua.	A menudo irregular; difícil de comparar.
Senescencia	Temperatura, duración del día, hormonas, sequía.	Difícil de calificar: senescencia parcial, a veces caída parcial.



Protocolo y base de datos

Datos preexistentes que se pueden emplear. Datos de la Red Europea de seguimiento de ecosistemas forestales (Nivel II)

Recopilación de datos de los últimos 20 años

Variable "Fenología"

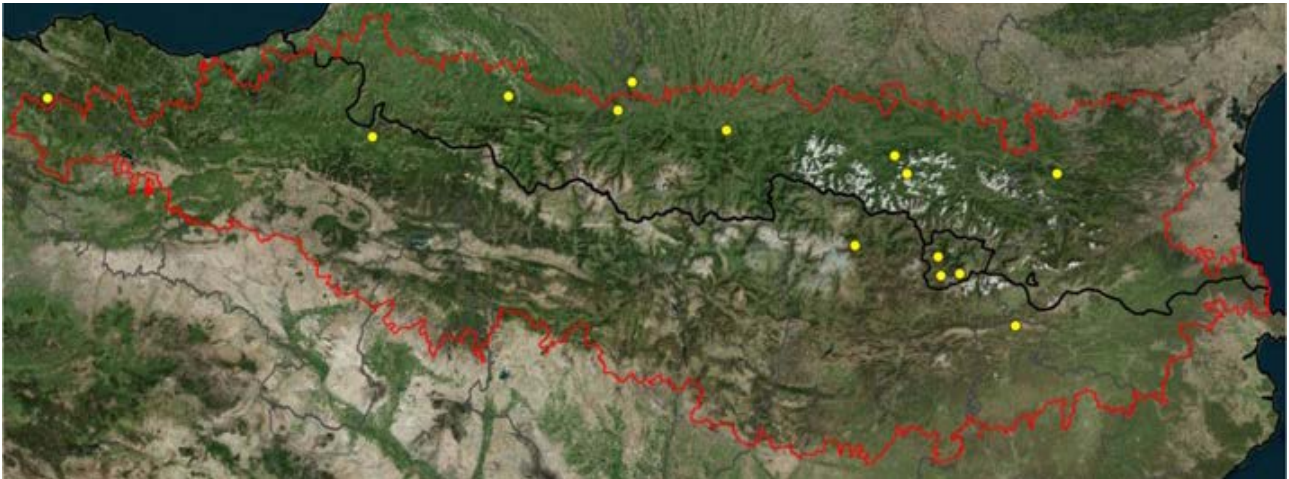
- 7 parcelas francesas
- 4 parcelas españolas
- 3 parcelas andorranas



Transfronterizo

Primeras lecturas: años 1990

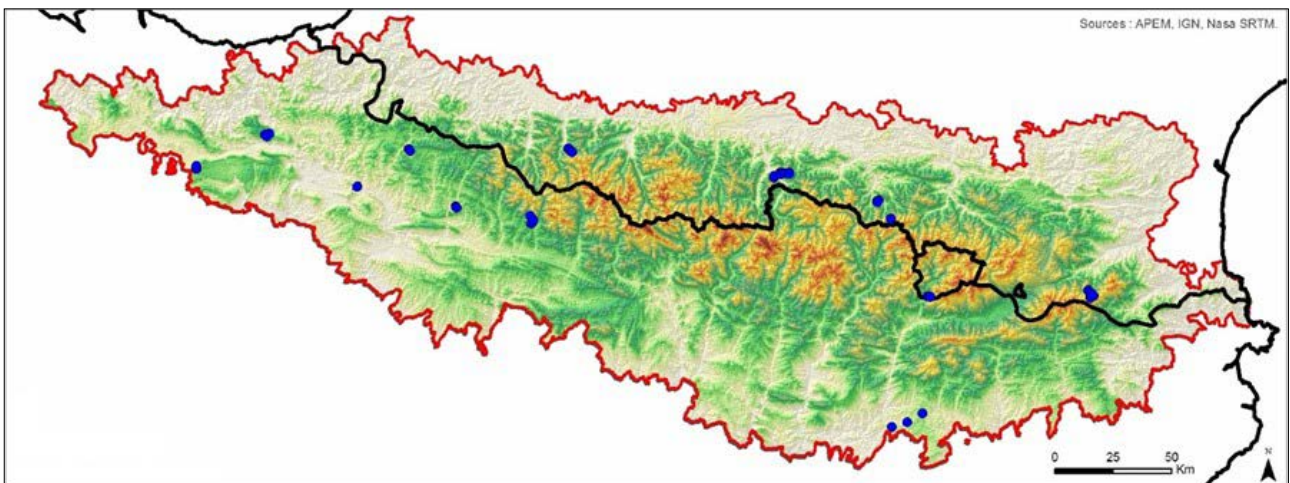
Harmonización: 1997



Datos del Observatorio Pirenaico del Cambio Climático - Serie de 10 años (2013-2022)

Dado que los datos fenológicos disponibles sobre el macizo son escasos, se decidió **crear una red de 63 parcelas adicionales** distribuidas de forma que se centraran en las principales especies arbóreas del macizo y que cubrieran la variabilidad de la cordillera pirenaica (altitud, gradientes este-oeste y norte-sur).

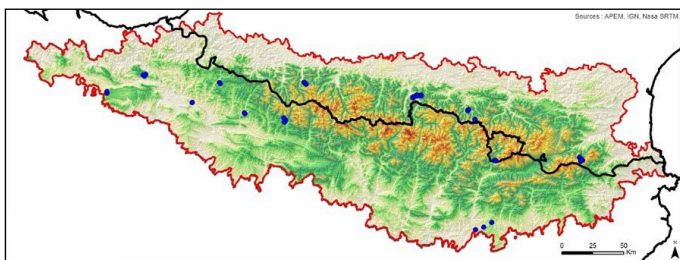
En aras de la comparación y la complementariedad, el protocolo aplicado se inspira en el de la red europea de seguimiento de los ecosistemas forestales mencionada anteriormente.



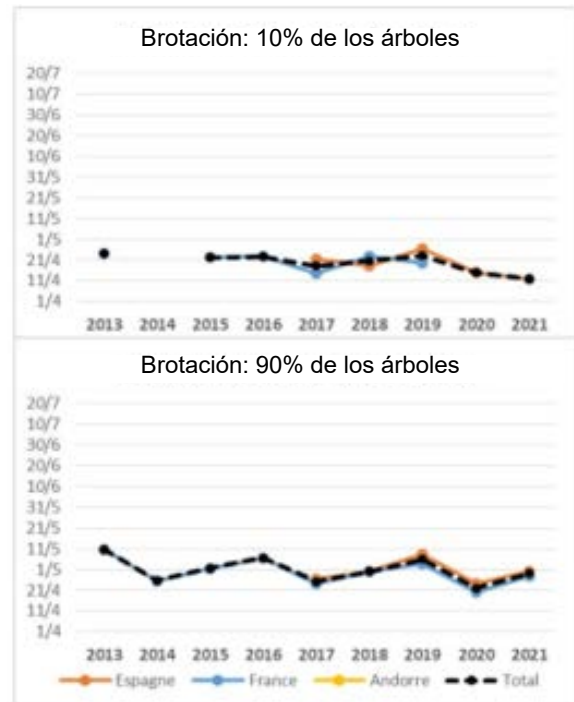
Resultados

Roble albar - *Quercus petraea*

6 parcelas	Número	Altitud mínima	Altitud máxima
España	3	782 m	996 m
Francia	3	1.012 m	1.089 m
Andorra	-	-	-

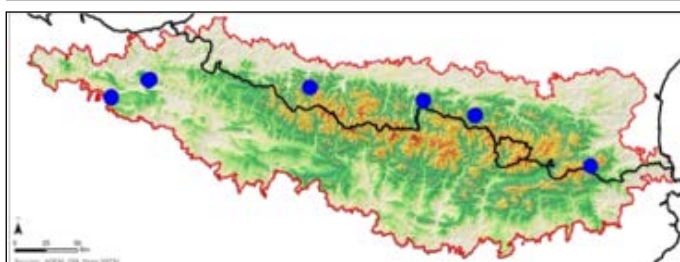


Ligera variabilidad interanual
Estabilidad en el tiempo

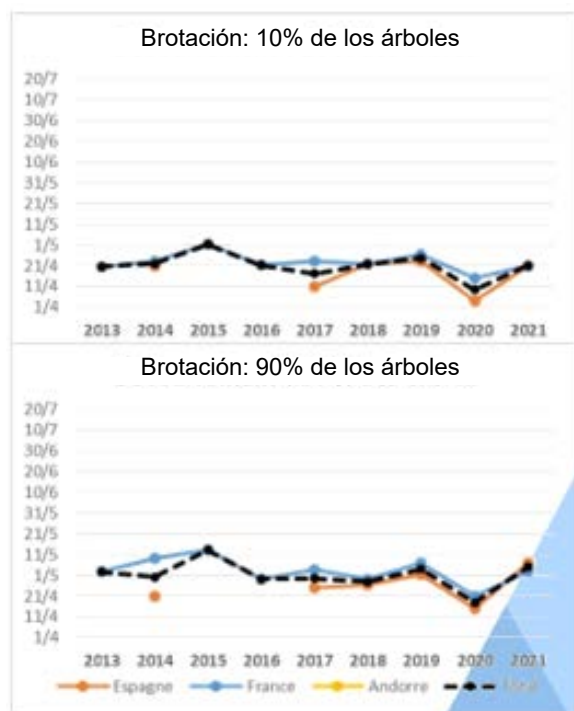


Haya común - *Fagus sylvatica*

6 parcelas	Número	Altitud mínima	Altitud máxima
España	6	866 m	1.145 m
Francia	13	828 m	1.790 m
Andorra	-	-	-

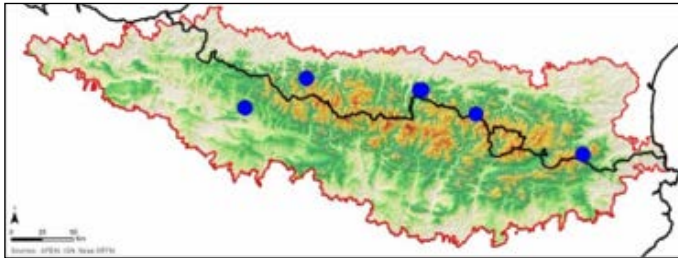


Ligera variabilidad interanual
Estabilidad en el tiempo

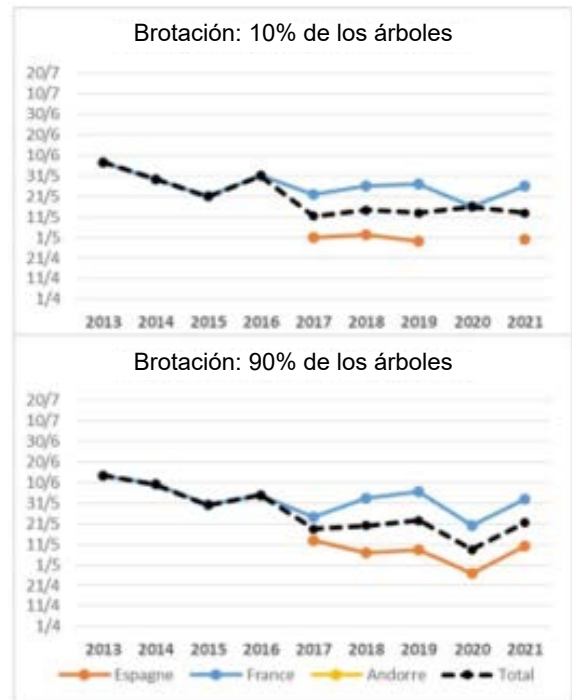


Abeto común - *Abies alba*

13 parcelas	Número	Altitud mínima	Altitud máxima
España	3	707 m	932 m
Francia	10	1.062 m	1.797 m
Andorra	-	-	-

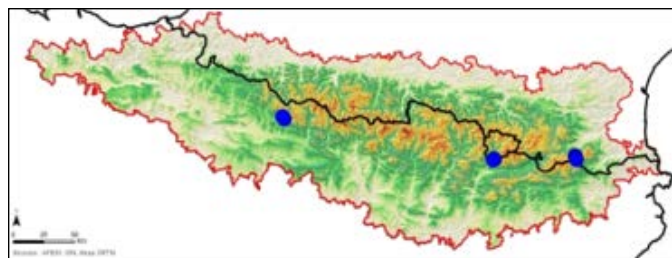


Alta variabilidad interanual
Ligero progreso en la brotación?
► Desconfianza con la curva total

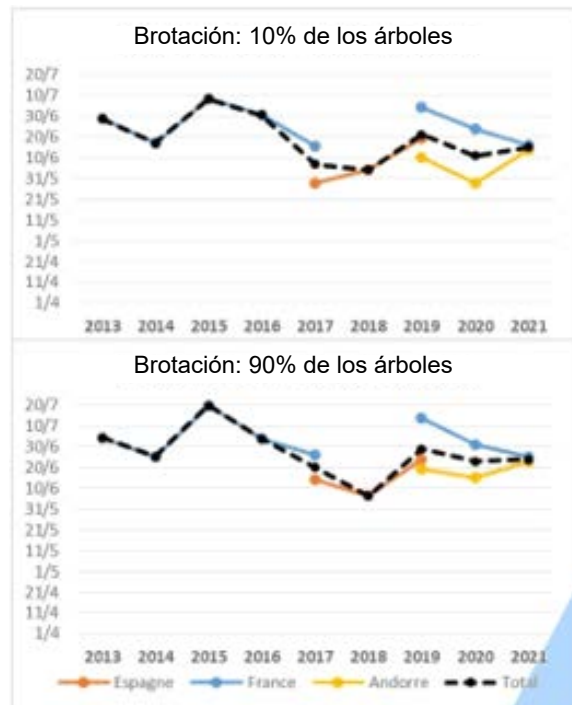


Pino negro - *Pinus uncinata*

12 parcelas	Número	Altitud mínima	Altitud máxima
España	3	1.660 m	1.930 m
Francia	6	1.868 m	2.221 m
Andorra	3	1.829 m	2.010

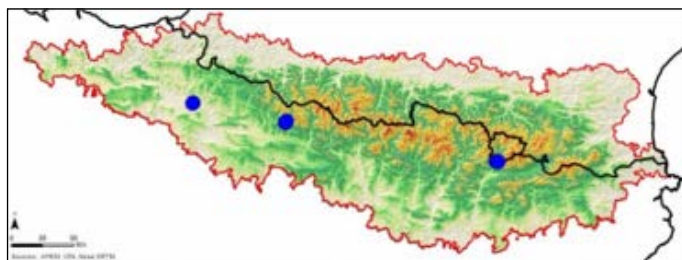


Muy alta variabilidad interanual
Estabilidad en el tiempo
► Desconfianza con la curva total

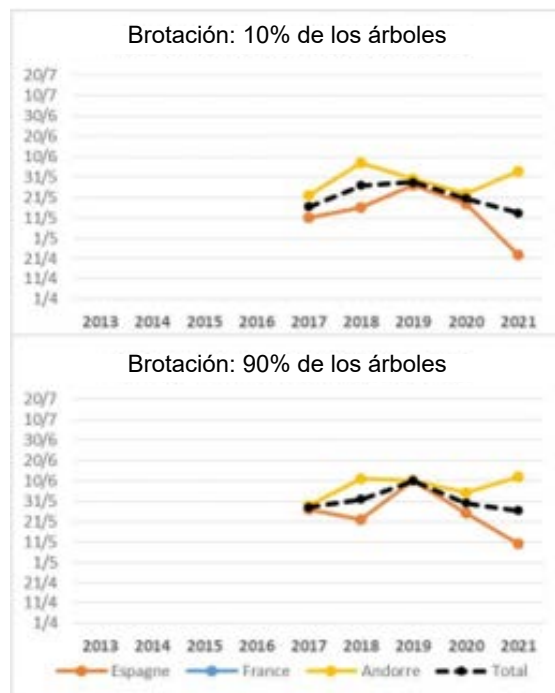


Pino silvestre - *Pinus sylvestris*

10 parcelas	Número	Altitud mínima	Altitud máxima
España	6	600 m	1.625 m
Francia	-	-	-
Andorra	4	1.418 m	1.731 m

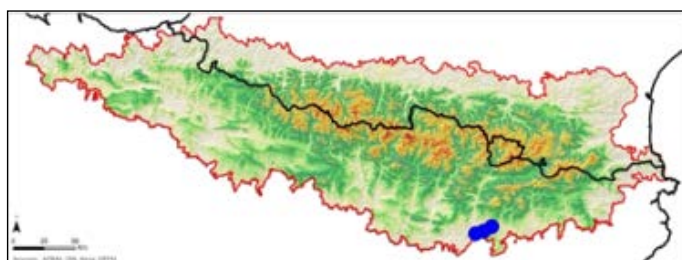


Ligera variabilidad interanual
Estabilidad en el tiempo
► Para relativizar (serie aún corta)



Pino salgareño - *Pinus nigra Salzmannii*

3 parcelas	Número	Altitud mínima	Altitud máxima
España	3	660 m	850 m
Francia	-	-	-
Andorra	-	-	-



Ligera variabilidad interanual
Estabilidad en el tiempo
► A relativizar (serie aún corta)



Perspectivas

Disponer de series temporales más largas

Creado en 2013, el **Observatorio Pirenaico del Cambio Climático ha hecho un seguimiento de 10 años de la brotación** (desborre) de las principales especies forestales del macizo. Los primeros resultados muestran, por lo general, que la variabilidad interanual de las especies es mayor cuanto mayor es la altitud en la que se encuentran las especies en cuestión (***Pinus uncinata* y *Abies alba* parecen ser las más afectadas por estas variaciones de un año a otro**). Las especies más estables, como *Fagus sylvatica*, no deben descuidarse; al contrario, debido a su relativa estabilidad, un cambio en las fechas de desborre implicaría un profundo cambio en las condiciones climáticas de la zona.

Si bien estas series siguen siendo relativamente cortas, su principal interés es iniciar curvas de tendencia y constituir así una base de comparación tangible para los años futuros. La recurrencia de este tipo de planos determinará la capacidad del Observatorio para poner de relieve los fenómenos actuales.

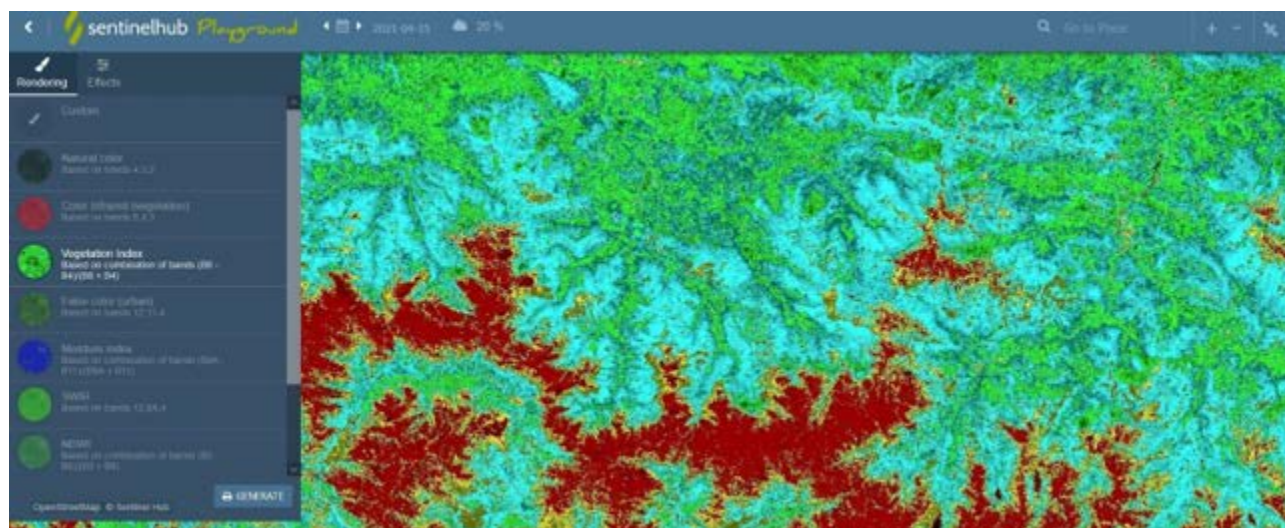
Teledetección

La sostenibilidad de este seguimiento también podría mejorarse mediante el uso de nuevas tecnologías y, en particular, el uso de imágenes por satélite. El despliegue de satélites de observación de la Tierra,

como el programa europeo Sentinel, permite realizar un seguimiento de la vegetación. En efecto, la recurrencia de una imagen prevista por término medio cada 5 días, unida a una precisión de píxeles del orden de 20x20 m sobre el terreno, permite prever un seguimiento preciso de la fenología. El principal problema, por el momento, continúa siendo la gestión de la nubosidad que oscurece la superficie terrestre y, por tanto, impide la posibilidad de emplear las bandas espectrales del dominio visible mediante los índices de vegetación habituales.

Por otra parte, gracias a la democratización de los datos RADAR (Sentinel-1) o LIDAR cabe esperar que haya buenas perspectivas para cartografiar con precisión la fenología o incluso la distribución de las especies y comunidades vegetales. *A priori*, su principal ventaja es que pueden penetrar en las nubes y, por tanto, adquirir datos incluso en condiciones de nubosidad, una circunstancia bastante habitual en primavera en las montañas.

Por su concomitancia con el despliegue de los satélites Sentinel, el seguimiento fenológico iniciado por el Observatorio Pirenaico del Cambio Climático constituye una base de datos de campo que puede resultar de capital importancia para la calibración de los modelos informáticos necesarios para su uso rutinario.



Extracto del mapa del índice de vegetación (en rojo destacan las zonas minerales lacustres y urbanas, en azul los bosques y en verde las praderas).



EVOLUCIÓN DEL ESTADO SANITARIO DE LOS BOSQUES PIRENAICOS



Si las condiciones climáticas se vuelven demasiado severas, con un aumento de los periodos de estrés hídrico, es probable que el riesgo de mortalidad de los árboles aumente. Este marchitamiento suele ir precedido de signos precursores que afectan a la salud del árbol. Como resultado se deriva un indicador para calificar los primeros daños del cambio climático y así prever los riesgos de pérdida de producción silvícola e incluso los riesgos de marchitamiento.

Sin embargo, se trata de un factor multifactorial que también puede reflejar, por ejemplo, condiciones pedológicas desfavorables (pH, caliza activa, encharcamiento, etc.) o ataques de parásitos (que

pueden verse favorecidos o no por el cambio climático).

Por otro lado, aparte de los sucesos extremos, es habitual que la repetición de condiciones climáticas severas acabe debilitando a los árboles, que se ven obligados a recurrir constantemente a sus reservas. Algunas especies también son más tolerantes que otras, y disponen de estrategias para evitar el estrés (como la caída temprana de las hojas para limitar la evapotranspiración). La percepción de este indicador se retrasará, pues, con respecto a las primeras señales; por eso lo hemos calificado de indicador a medio plazo.



Fotografía: Aurélien COLAS - CRPF Occitanie © CNPF

Protocolo y base de datos

Datos preexistentes que se pueden emplear. Datos de la Red Europea de seguimiento de ecosistemas forestales (Nivel I y II)

Recopilación de datos de los últimos 20 años

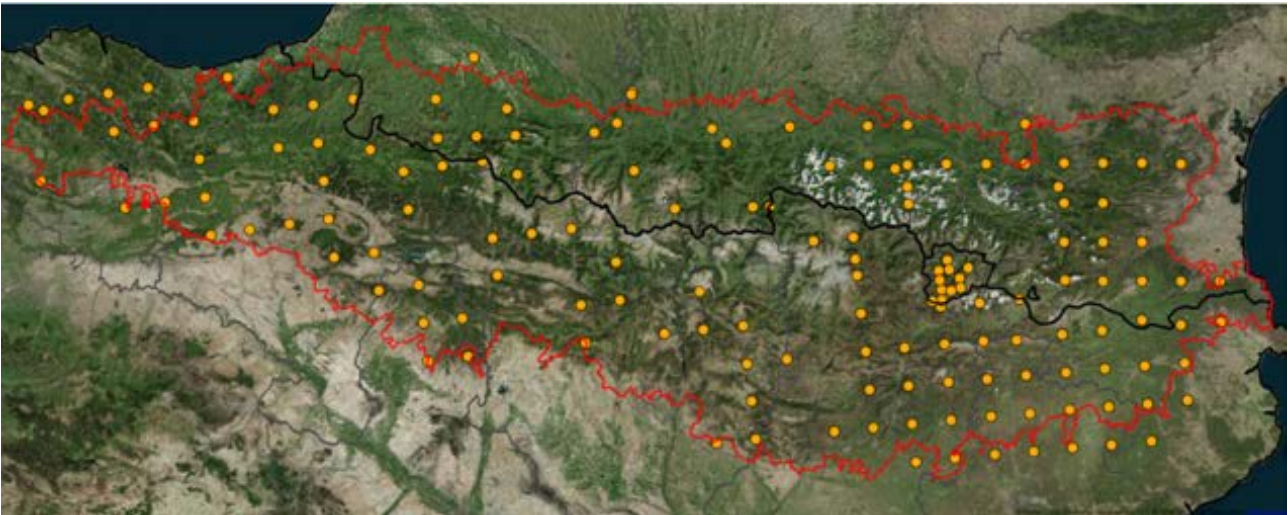
Variable: "Salud forestal"

- 45 parcelas francesas
- 98 parcelas españolas
- 11 parcelas andorranas

Transfronterizo

Primeras lecturas: años 1990

Harmonización: 1997



Las parcelas de esta red se distribuyen según una cuadrícula de 16 km, densificada en Andorra. El resultado es una cobertura regular del macizo muy representativa de la diversidad de los ecosistemas forestales pirenaicos.

Protocolo

Durante las mediciones anuales, se registran diversas variables, como la coloración anormal (amarillamiento, enrojecimiento, etc.), el déficit foliar y la mortalidad de las ramas.

La **coloración anormal** suele deberse a hechos puntuales y puede pasar desapercibida para los calificadores en función del periodo en el que se realice el muestreo.

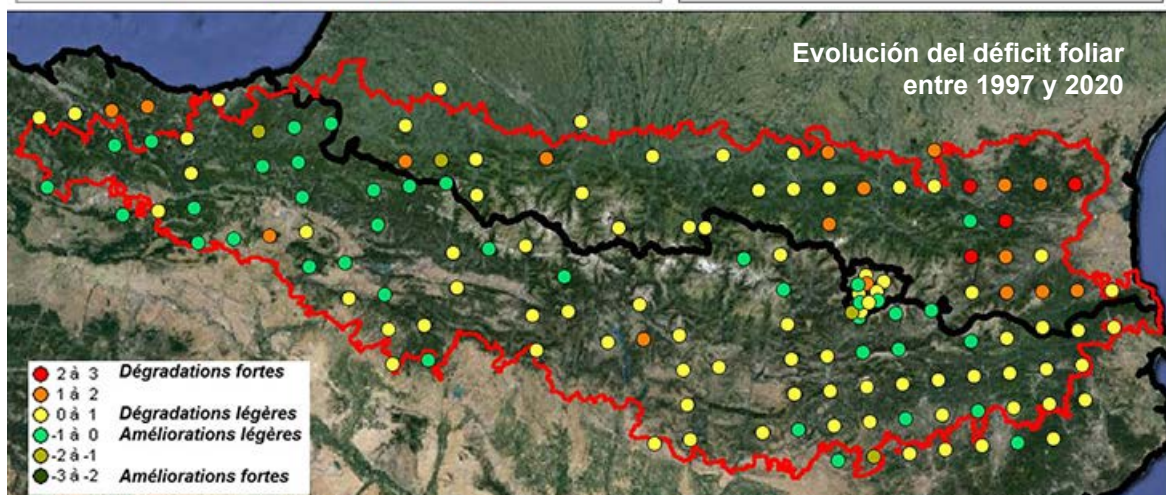
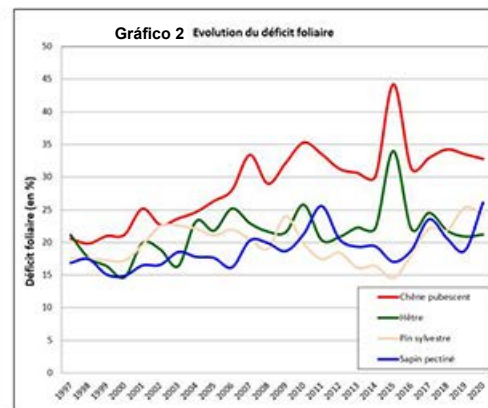
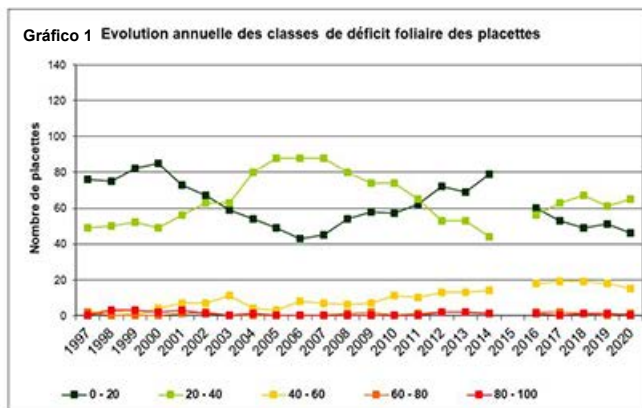
La **mortalidad de las ramas** tiene más consecuencias a largo plazo, pero como estas parcelas pueden estar gestionadas, los gestores suelen eliminar preferentemente los árboles afectados durante la tala.

Aunque el déficit foliar está sometido al mismo impacto debido a la silvicultura, cuando la extensión de los fenómenos se agrava, los efectos también se pueden percibir en el **déficit foliar** medio de los árboles que se conservan después de la tala. Además, la fotosíntesis permite al árbol crecer, y la reducción de su superficie fotosintética, debida al déficit foliar, plantea la posibilidad de que se produzcan pérdidas de producción que preceden a posibles riesgos de marchitamiento. Por ello, nos hemos centrado en esta variable en el contexto del seguimiento de la salud de nuestro observatorio.

Resultados

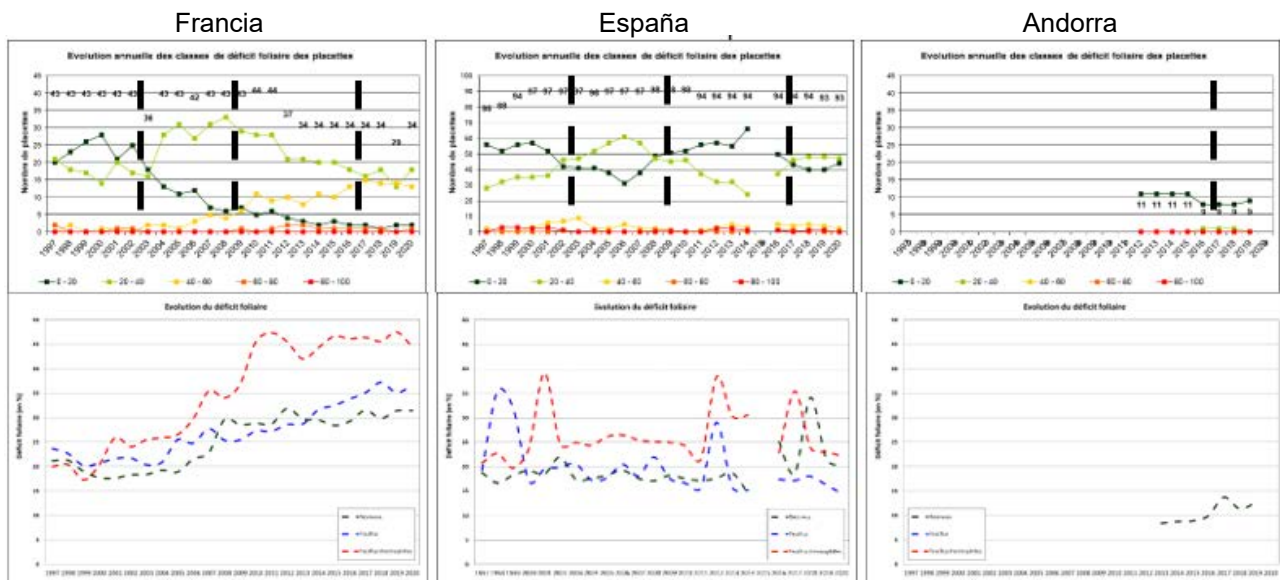
El déficit foliar de un árbol se expresa en porcentaje de hojas o agujas que le faltan. Así pues, el déficit foliar de las parcelas se corresponde con el déficit foliar medio de todos los árboles de la parcela. Los resultados suelen presentarse en clases de intensidad que oscilan desde entre el 0 y el 20 % («déficit foliar muy leve») hasta entre el 80 y el 100 % («déficit foliar muy alto»). Los resultados de las parcelas pirenaicas se presentan a continuación, y de ellos se extraen las siguientes observaciones:

- Una tendencia al deterioro del déficit foliar con efectos repentinos (gráfico 1):
 - Por primera vez después de 2003, con un predominio de las parcelas que presentan un déficit foliar de entre el 20 y el 40%.
 - Por segunda vez en 2009, con un aumento neto de las parcelas con un déficit foliar de entre el 40 y el 60%, a pesar de la vuelta al predominio de las parcelas con entre un 0 y un 20%,
- y una tercera vez en 2017, con un marcado aumento de las parcelas con un déficit foliar de entre el 40 y el 60% y una fuerte disminución de las parcelas con un déficit foliar inferior al 20%.
- No todas las especies de árboles se ven afectadas de la misma manera (gráfico 2). Aunque todas las especies muestran fluctuaciones, son las llamadas especies termófilas (por ejemplo, el roble pubescente en el gráfico) las que parecen más afectadas. Aunque estas especies tienen fama de ser resistentes a las condiciones climáticas severas, se ven afectadas por ellas y ocupan un nicho ecológico que dejan las demás especies, por lo que están al límite de su propio nicho ecológico. Por lo tanto, cualquier tipo de empeoramiento del clima las expone a pérdidas foliares.
- Las diferencias territoriales, tal y como se ilustra en el apartado siguiente.



Diferencias territoriales

Entre la cuenca francesa y la española



A la vista de estos gráficos, **el impacto del cambio climático parece ser más importante para la vertiente francesa que para la española o la andorrana**. De hecho, desde 2003, la parte de las parcelas con un déficit foliar de entre el 20 y el 40 % se ha convertido en la mayoritaria, pero pronto podría ser sustituida por las parcelas con un déficit foliar de entre el 40 y el 60 %, cuya presencia ha ido aumentando desde 2006. Aunque todas las especies parecen verse afectadas, parece que **los árboles planifolios termófilos son los mayores afectados por esta tendencia**. En cambio, en España y Andorra, las consecuencias parecen ser menos pronunciadas y las fases de mejora general siguen a las de deterioro.

Los árboles de la vertiente española, expuesta principalmente al sur, han estado sometidos a acontecimientos climáticos que han provocado la ordenación de los genotipos más adaptados, mientras que los árboles de la vertiente francesa, expuesta principalmente al norte y normalmente a un clima más favorable, pueden no haber sido sometidos a este tipo de acontecimientos con anterioridad. Los actuales au-

mentos de temperatura y sequía están provocando un mayor deterioro de la salud de los árboles, lo que quizá sea uno de los primeros signos de esta ordenación genética.

Entre la vertiente atlántica y la mediterránea

El mapa de la página anterior muestra claramente la fuerte influencia de las condiciones climáticas mediterráneas en las que se concentran las parcelas que muestran un fuerte deterioro de la salud de las masas forestales. Al desglosar la serie temporal año tras año, se observa que esta tendencia avanza cada vez más hacia el oeste y, previsiblemente, ahora se espera que alcance las parcelas de Ariège.

En cambio, los rodales de la parte occidental de los Pirineos parecen ser más resistentes en general (predominio de parcelas con ligeras mejoras en los últimos 20 años). Puede que la influencia climática del océano, con importantes entradas marítimas, compense los cambios que se producen actualmente, pero ¿durante cuánto tiempo? Es difícil determinarlo.



EVOLUCIÓN DE LA COMPOSICIÓN FLORÍSTICA DE LOS BOSQUES PIRENAICOS



Si el cambio climático ha alcanzado tal punto que aumenta el marchitamiento debido a la inadaptación de las especies a las nuevas condiciones climáticas, se abrirán espacios que podrían acoger nuevas especies más aclimatadas.

Es probable que las áreas de distribución de cada especie se modifiquen en función de sus aptitudes y tolerancias individuales y que, a su vez, la composición florística de los hábitats forestales y los nichos ecológicos se vean afectados. **El área de distribución de las especies se convierte, pues, en un indicador del cambio climático a largo plazo** que refleja profundos cambios en los ecosistemas forestales.

Este indicador es multifactorial, por lo que puede resultar difícil determinar la influencia de cada factor.

Dicho esto, hay un factor con una importancia primordial: el impacto antropogénico. De hecho, es importante tener en cuenta que la distribución de los ecosistemas actuales depende en gran medida de las prioridades de uso del suelo (bosques, agostaderos, estaciones de esquí, etc.) que se les quiera dar y, por tanto, de las decisiones políticas y sociales. Los gestores forestales suelen hablar de un aumento de la altitud de las especies arbóreas, pero actualmente estas zonas suelen estar ocupadas por pastos de verano. Y si los bosques de las llanuras sufren, es probable que ocurra lo mismo con los prados de las llanuras, lo que refuerza la importancia de disponer de pastos de verano para los ganaderos. A esta altura, puede que no haya suficiente espacio para todos.



Protocolo y base de datos

Datos preexistentes que se pueden emplear

Las bases de datos florísticas (inventarios nacionales, asociaciones, museos botánicos, etc.) tienen sus propias especificaciones. Por lo tanto, la elección de los datos seleccionados se basó en:

- el carácter sistemático del muestreo para evitar la introducción de sesgos hacia determinadas especies, hábitats o incluso territorios;
- el carácter "exhaustivo" de los inventarios, en los que la ausencia de datos implica la ausencia de la especie, a diferencia de los estudios puntuales de una especie que no permiten dictaminar la ausencia de otros;

- la regularidad de los inventarios para evitar los efectos de la casualidad (muestreo, único); y
- la posibilidad de acoplar los inventarios a variables explicativas (altitud, exposición, topografía,...).

Estos nos llevó a **seleccionar únicamente los inventarios forestales nacionales**; en Andorra, no se pudo usar ningún inventario de este tipo. Sin embargo, existen diferencias en el funcionamiento de los inventarios franceses y españoles (especies inventariadas, taxonomía, periodicidad de los inventarios en los territorios en cuestión, etc.). Por ello se llevó a cabo una selección final de únicamente 46 especies leñosas comunes en ambos inventarios.

Consolidación de datos existentes de los inventarios forestales nacionales

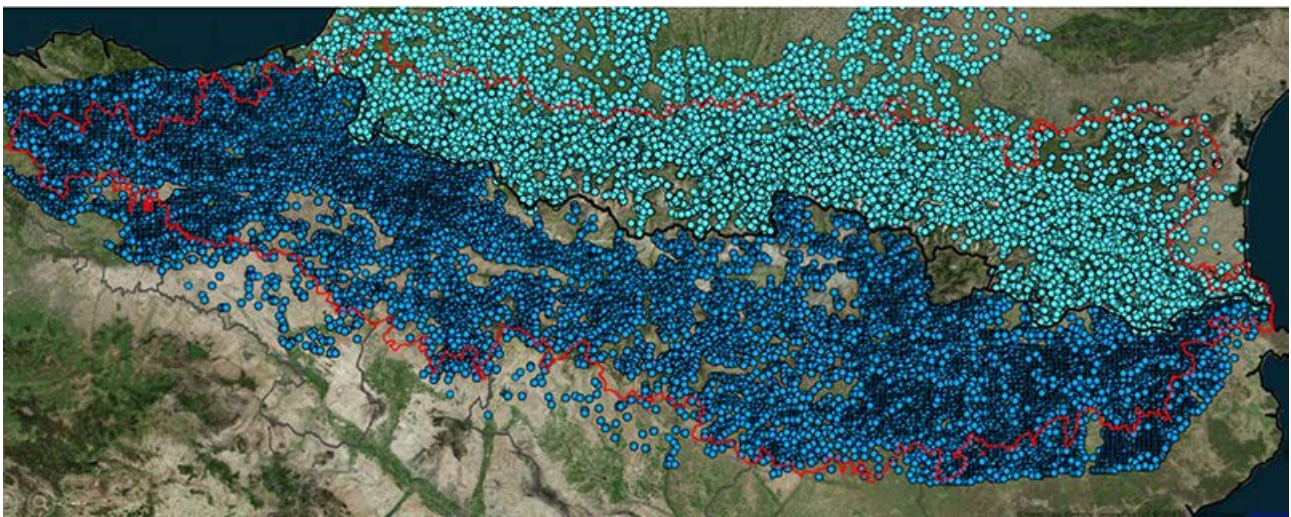
Análisis de los datos de los últimos 20 años

Variable: "Distribución"

- 6.602 parcelas francesas
- 11.989 parcelas españolas
- -- parcelas andorranas

Transfronterizo

Primeros registros: alrededor de la década de 1990



Metodología

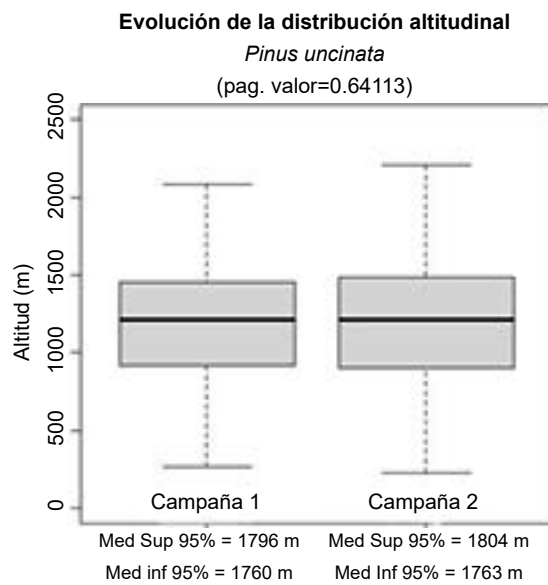
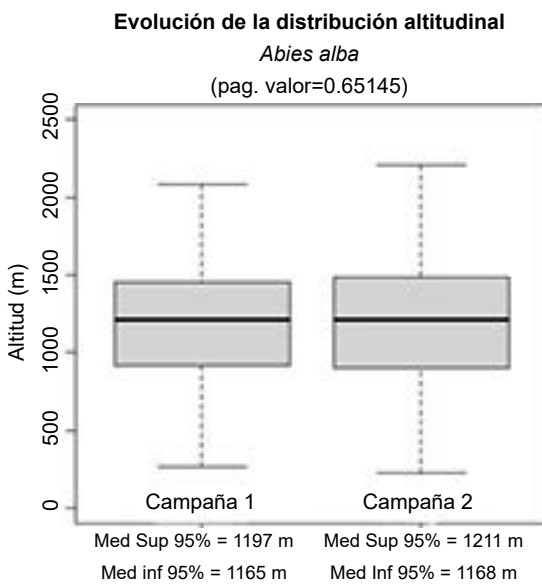
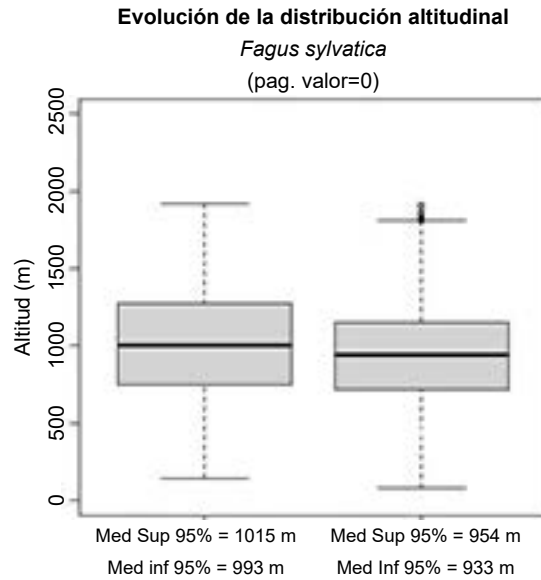
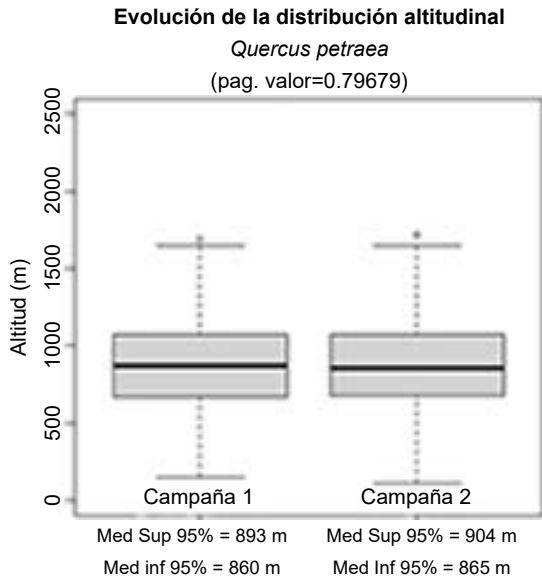
En aras de la homogeneidad de los resultados y de la intensidad de muestreo, se seleccionaron dos periodos (1986-2001 y 2005-2019). El análisis de los posibles cambios en el nicho ecológico se centró en cinco variables de distribución: altitud, exposición, pendiente, longitud y latitud.

Con base en trabajos científicos similares, se aplicaron varios tratamientos estadísticos:

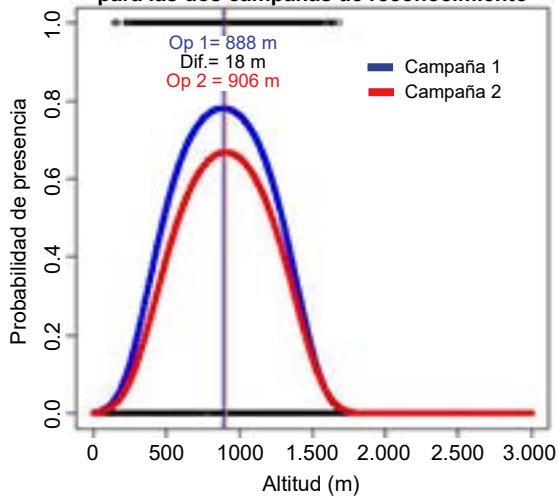
- Análisis de componentes principales,
- Pruebas de comparación de medias, y
- Modelización del óptimo ecológico mediante regresión logística.

Resultados

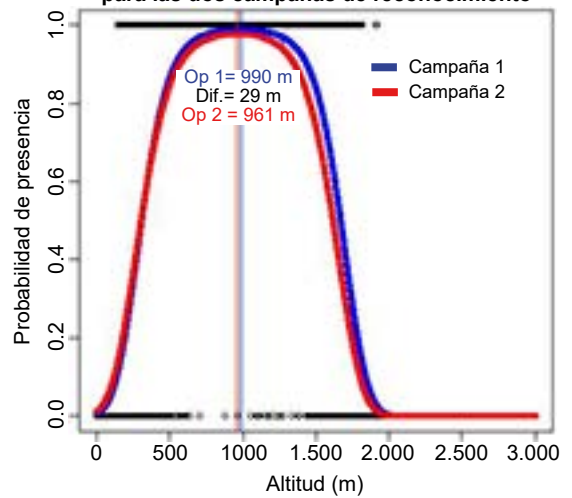
Los siguientes gráficos ilustran los resultados de cuatro especies pirenaicas con respecto a la altitud:



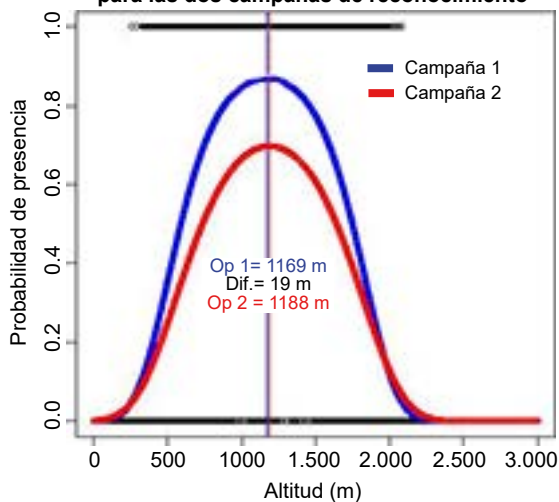
Regresiones logarítmicas de *Quercus petraea* para las dos campañas de reconocimiento



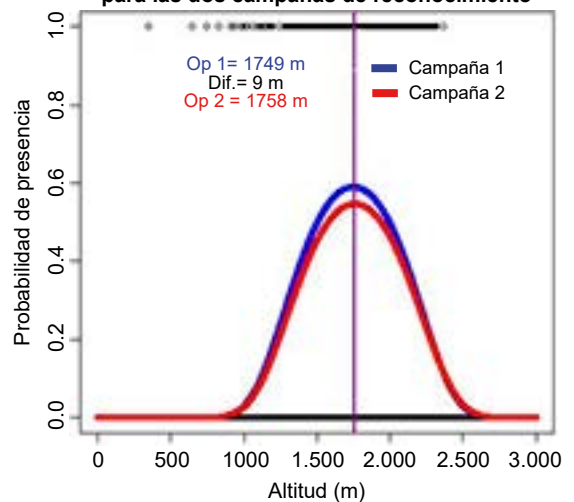
Regresiones logarítmicas de *Fagus Sylvatica* para las dos campañas de reconocimiento



Regresiones logarítmicas de *Abies alba* para las dos campañas de reconocimiento

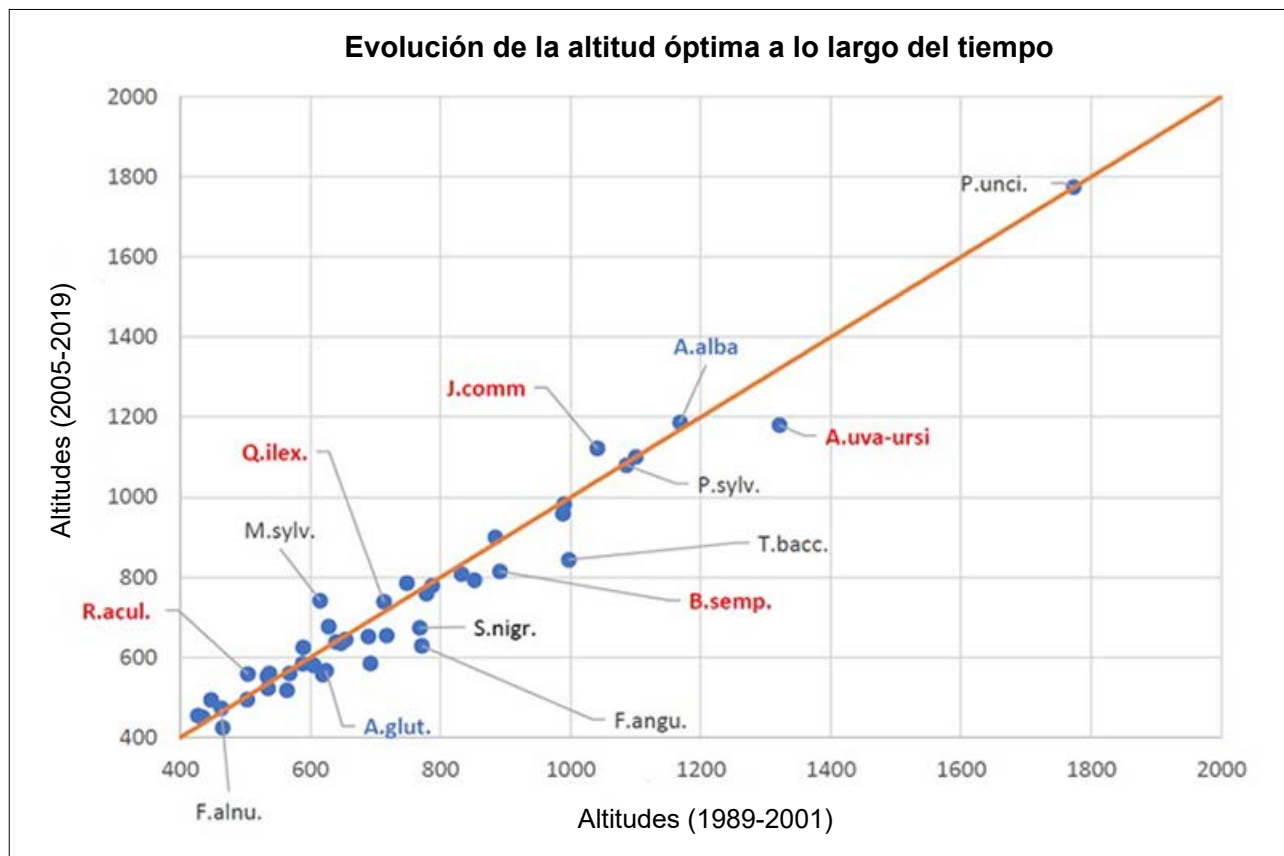


Regresiones logarítmicas de *Pinus uncinata* para las dos campañas de reconocimiento



Estos resultados pueden compararse con mayor facilidad en el siguiente gráfico. Los puntos situados por encima de la bisectriz naranja indican un aumento de la altitud para la especie en cuestión, mientras

que los situados por debajo indican una disminución del óptimo altitudinal. Las especies en rojo son xerófilas y las azules son higrófilas.



Discusión

Dado que el cambio suele provocar un aumento de las temperaturas y una prolongación de los periodos de sequía, se suelen esperar las siguientes consecuencias:

- especies que se desplazan a mayor altura,
- desplazamiento de las áreas de distribución hacia el norte, y
- desplazamiento de las áreas de distribución hacia el oeste (Mediterráneo) y el este (Atlántico).

Los resultados contrastan e incluso resultan bastante inesperados en relación con estas hipótesis iniciales. El siguiente cuadro los resume:

Desplazamiento	Altitud (m)		Latitud (km)		Longitud (km)		Pendiente (%)	
	Hacia arriba	Hacia abajo	Hacia el norte	Hacia el sur	Hacia el oeste	Hacia el este	Hacia lo llano	Hacia la pendiente
Nº especies significativas	7	11	16	6	22	5	2	8
Especies no significativas	11	16	10	7	15	4	11	18

- En relación a la **altitud**, para la mayoría de las especies, los óptimos observados son bastante estables. Mientras que algunas especies, como el rusco (*Ruscus aculeatus*) o el manzano silvestre (*Malus sylvestris*) muestran una tendencia a subir en altitud, a la inversa, también se han observado descensos como en el caso del tejo común (*Taxus baccata*) o del fresno de hoja estrecha (*Fraxinus angustifolia*). Estos resultados contraintuitivos se han observado también en otras zonas montañosas (Lenoir *et al.*, 2008) y podrían deberse a la influencia antropogénica. Así, el abandono agrícola, al liberar espacios que antes estaban abiertos en las llanuras o en el piedemonte, provoca el cierre de estos ambientes y su colonización por parte de especies forestales (Bodin *et al.*, 2013), tanto en el caso de las especies heliófilas, como el fresno, *Fraxinus angustifolia* (abandonado recientemente) como en el de las esciófilas como el tejo, *Taxus baccata* (abandonado a mediados del siglo XX). La silvicultura también contribuye a estos cambios independientemente del clima. El roble rojo americano (*Quercus rubra*) es un ejemplo interesante, ya que se plantó de forma intensiva a baja altitud para sustituir al moribundo castaño (*Castanea sativa*).
- En cuanto a los **movimientos este-oeste**, se observa que, entre las especies más comunes, varias muestran un movimiento significativo hacia el oeste, como el abeto común (*Abies alba*) o el pino silvestre (*Pinus sylvestris*). Esto podría explicarse por las condiciones que se están vol-

viendo más secas en general, especialmente en la vertiente mediterránea. Así pues, las especies xerófilas podrían colonizar nuevas zonas que les resulten favorables, mientras que las especies que necesitan más precipitaciones quedarían confinadas a las regiones que aún cuentan con abundantes lluvias del oeste de la cadena. Sin embargo, estos resultados tendrán que confirmarse en el futuro.

- Para los **movimientos norte-sur**, de acuerdo con la hipótesis inicial, los movimientos hacia el norte son mayoritarios, pero hay que matizar este resultado. Los Pirineos, orientados de este a oeste, ocupan toda la anchura del istmo que une la Península Ibérica con Europa y, por tanto, pueden ser un obstáculo natural para estos movimientos. Por añadidura, debido a esta orientación, si las especies francesas suben de altura, su movimiento general será hacia el sur y no hacia el norte. Esto es la clara muestra de la dificultad de interpretar los resultados en detalle, ya que muchos fenómenos interactúan entre sí.

Por último, cabe señalar que la flora leñosa suele ser longeva y, como tal, puede ver cómo sus fenómenos de adaptación se producen en escalas de tiempo más largas que las especies herbáceas, por ejemplo. Por lo tanto, estos datos deberían consolidarse a medio plazo, y quizás enriquecerse con análisis equivalentes de la flora herbácea, cuyos fenómenos de adaptación pueden ser más rápidos.

Para profundizar más

PICARD, J.; 2021. *Evolution de la composition floristique pyrénéenne au regard du changement climatique*, Mémoire de stage Bordeaux Sciences Agro / CNPF, ACCLIMAFOR-OPCC, 31 pp. y anexos.

BODIN, J.; *et al.*, 2013, *Shifts of forest species along an elevation gradient in Southeast France: climate*

change or stand maturation?, Journal of Vegetation Science, 24(2), pp. 269-283.

LENOIR, J.; *et al.*, 2008. *A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century*, Science, 320(5884), pp. 1768-1771.





USO DE LA TELEDETECCIÓN COMO HERRAMIENTA DE SEGUIMIENTO DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS BOSQUES PIRENAICOS

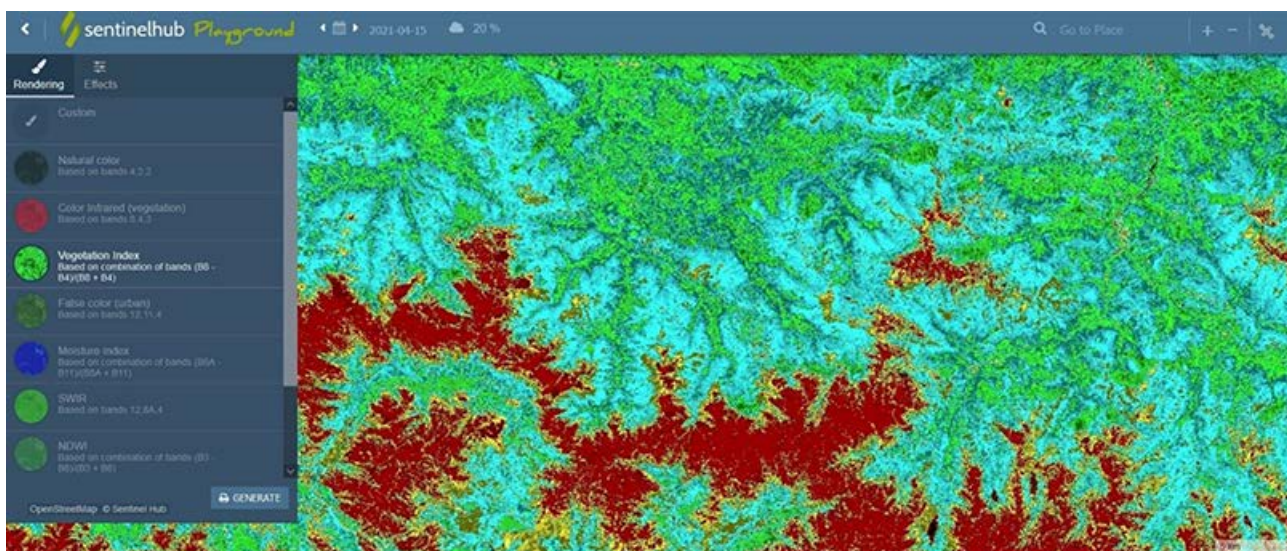


El seguimiento de las redes de monitoreo, especialmente en lo que se refiere a su escalado y continuidad en el tiempo, puede mejorarse mediante el desarrollo de las nuevas tecnologías y, en particular, el uso de imágenes de satélite.

El despliegue de satélites de observación de la Tierra, como **el programa europeo Sentinel**, permite contemplar el seguimiento de la vegetación. La recurrencia de las imágenes proporcionadas en promedio cada 5 días, junto con una precisión de píxel del orden de 20 m, permite, por ejemplo, un seguimiento preciso de la fenología. El principal problema sigue siendo por el momento la gestión de la nebulosidad y las nubes que oscurecen la superficie terrestre y por tanto la posibilidad de utilizar las bandas espectrales del dominio visible mediante los habituales índices de vegetación.

Por otro lado, la democratización de los **datos RADAR (Sentinel-1) o LIDAR** ofrece buenas perspectivas para mapear con precisión la fenología o incluso la distribución de especies y comunidades de plantas y su estado de vitalidad. A priori, su principal ventaja sería poder atravesar las nubes y así adquirir datos incluso con tiempo nublado, que en realidad es bastante frecuente en primavera en las montañas.

Por su concomitancia con el despliegue de los satélites Sentinel, el seguimiento fenológico iniciado por el Observatorio Pirenaico del Cambio Climático (ver ficha 2.1) constituye una base de datos de campo que puede resultar de capital importancia para la calibración de los modelos informáticos necesarios para su uso en rutina.



Extracto del mapa índice de vegetación (en rojo destacan las zonas lacustres y suelo urbano, en azul los bosques y en verde los prados).



EJEMPLO DE USO DE TELEDETECCIÓN EN NAVARRA: SEGUIMIENTO FENOLÓGICO DE CUATRO ESPECIES FORESTALES



Autores

Itziar Ventas Sorbet, Jon Oroz Santamaria (GAN-NIK),
Raquel Tobar León (GAN-NIK),
Mikel Goikoetxea Barrios (GAN-NIK)

Introducción y objetivos

El seguimiento fenológico de especies se considera una herramienta esencial para detectar los impactos biológicos provocados por el cambio climático y diagnosticar la salud de los ecosistemas. Tradicionalmente, los estudios fenológicos se realizan mediante observaciones en campo, limitándose a un número reducido de especies vegetales individuales en una pequeña extensión geográfica, además de presentar un componente subjetivo por parte del observador. La teledetección, se presenta como una herramienta útil para resolver estos problemas, y por tanto es uno de los objetivos del Proyecto ACCLIMAFOR *aprovechar la sincronización las observaciones*

de fenología con los datos de los satélites Sentinel, y poner a prueba un enfoque metodológico basado en la teledetección para evaluar su viabilidad futura.

En el presente trabajo, se relacionan las observaciones en campo del estado fenológico de brotación, realizadas en los proyectos CANOPEE Y ACCLIMAFOR durante el período 2017 – 2021 en 4 especies forestales en Navarra; con los datos derivados de las imágenes Sentinel-2, con objeto de analizar el potencial de dichas imágenes en el seguimiento de la fenología.

Área de estudio y datos de partida

Entre los años 2017 y 2021 se ha realizado el seguimiento del estado fenológico de brotación en las especies forestales *Pinus sylvestris*, *Fagus sylvatica*, *Abies alba* y *Quercus Petraea*, en 4 parcelas en Navarra, localizadas en Lizoain, Sierra de Aralar, Burgui y Garaioa respectivamente. Estas parcelas forman parte de una red de observación más amplia en todo el Pirineo.

Cada uno de los sitios de observación está formado por 3 parcelas, separadas por una diferencia de cota de 100 m aproximadamente. Semanalmente se observan las copas de los árboles para determinar el estado de desarrollo de las yemas y se anota el estado de brotación de éstas, así como el porcentaje de yemas (10%, 50% o 90%) que haya brotado en el conjunto de la copa.

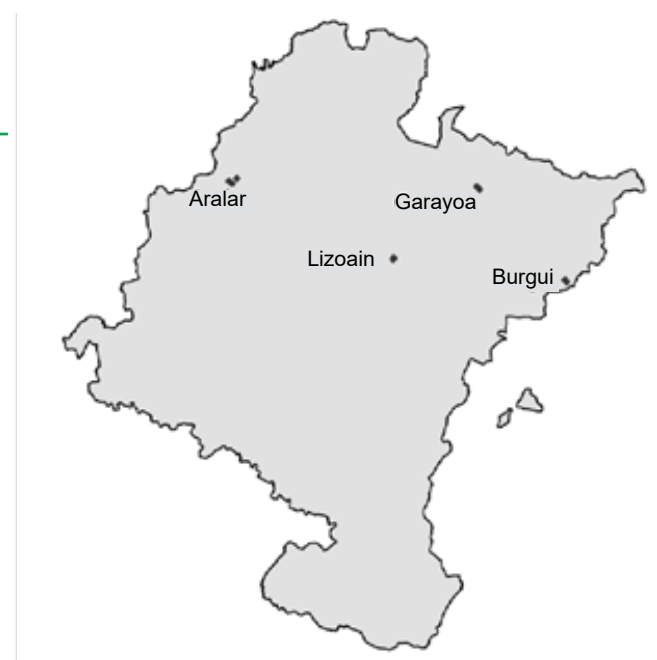


Figura 1. Localización de las zonas objeto de estudio.

ESPECIE	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Abies alba</i>	<i>Quercus petraea</i>	<i>Pinus sylvestris</i>
LOCALIZACIÓN	Sierra de Aralar	Burgui	Garayoa	Lizoain
Parcela 1	954 m	707 m	782 m	600 m
Parcela 2	1049 m	794 m	880 m	695 m
Parcela 3	1145 m	932 m	996 m	790 m

Tabla 1. Altitud de cada parcela en cada ubicación.

Metodología

1. Procesamiento de los datos de campo

Cada parcela está formada por 36 árboles, y en cada uno de ellos se observa el estado de brotación y el porcentaje de ocupación en la copa (10/50/90%). Estas observaciones se han procesado para obtener la media, la moda y media ponderada de las observaciones semanales de cada parcela y relacionarlos con las imágenes de satélite.

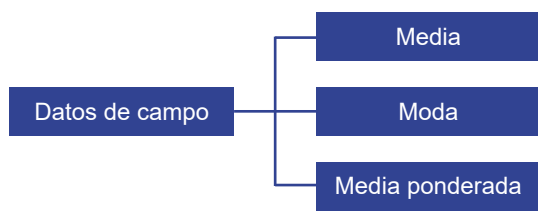


Figura 2. Resultados obtenidos del análisis de los datos de campo.

2. Procesamiento de las imágenes Sentinel-2 y la obtención de información derivada

Las imágenes de los satélites Sentinel-2 del programa Copernicus de la ESA se procesan para extraer información correspondiente a cada especie, con el fin de analizar si existe alguna relación entre el sen-

sor multiespectral de Sentinel-2 y los datos fenológicos observados en campo. El proceso consiste en los siguientes pasos, para los cuales se crea un script diferente:

1. Calcular los tres índices de vegetación (IV): kNDVI, GNDVI, NDWI para las tres parcelas de las cuatro especies.
2. Extraer las estadísticas zonales de cada índice de vegetación para cada área de estudio.
3. Eliminar los archivos que no presentan datos debido a la nubosidad en esas fechas.
4. Obtener las series temporales de cada zona, para cada índice de vegetación.

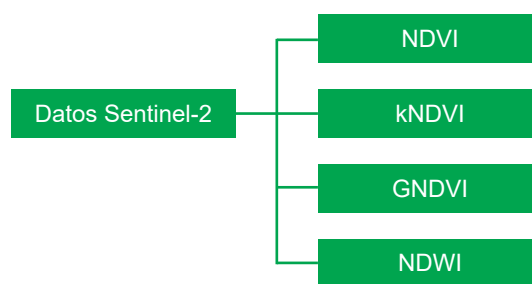


Figura 3. Resultados obtenidos de los datos de las imágenes Sentinel-2.

Resultados y discusión

1. Análisis de las series temporales de los índices de vegetación (IV)

Para cada especie forestal se han calculado series temporales en el periodo comprendido entre enero de 2017 y julio de 2021, con las variaciones de los

índices de vegetación NDVI, kNDVI, GNDVI y NDWI derivados de las imágenes Sentinel-2.

En los siguientes gráficos se pueden ver las medias máximas normalizadas de la parcela (puntos rojos) y los valores máximos normalizados de NDVI (línea verde) para la parcela 1 de cada una las especies.



Figura 4. Gráfico de la media de campo y la media de NDVI de la parcela 1 de las diferentes especies.

En las siguientes figuras se muestra la serie temporal (2017-2021) para los índices NDVI, kNDVI, GNDVI, NDWI para las tres parcelas para *Fagus sylvatica*.

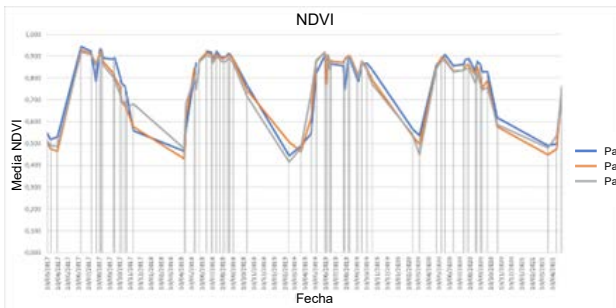


Figura 5. Serie temporal NDVI para *Fagus sylvatica*.

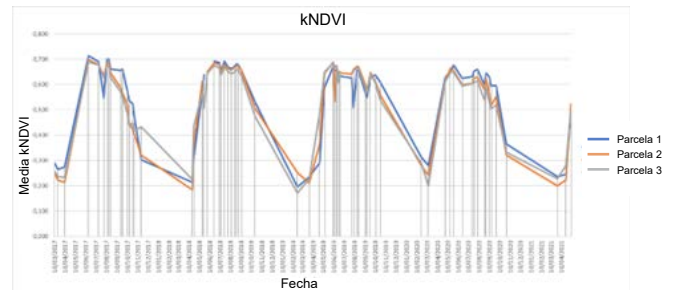


Figura 6. Serie temporal kNDVI para *Fagus sylvatica*.

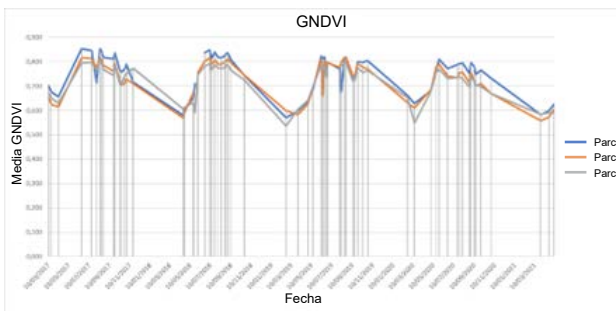


Figura 7. Serie temporal GNDVI para *Fagus sylvatica*.

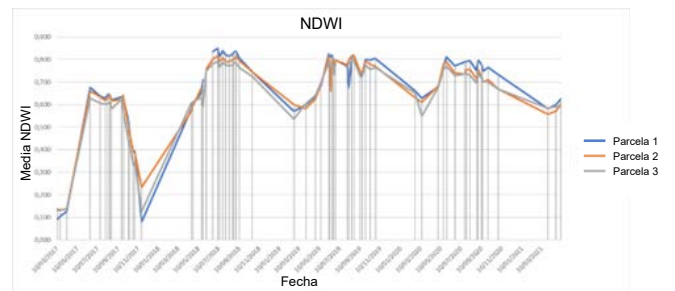


Figura 8. Serie temporal NDWI para *Fagus sylvatica*.

En las siguientes figuras se muestra la serie temporal (2017-2021) para los índices NDVI, kNDVI, NDWI para las tres parcelas para *Abies alba*.

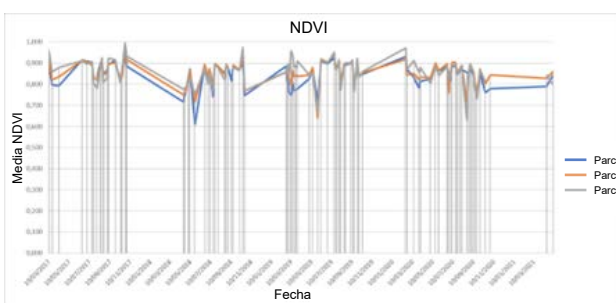


Figura 9. Serie temporal NDVI para *Abies alba*.

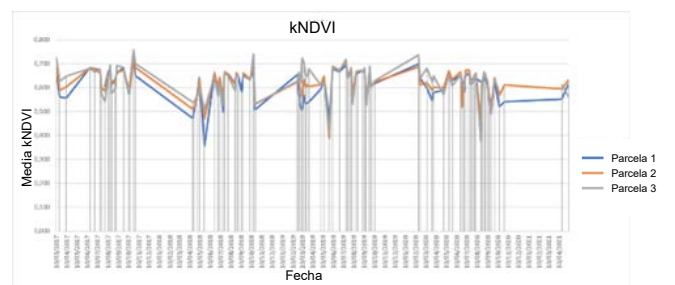


Figura 10. Serie temporal kNDVI para *Abies alba*.

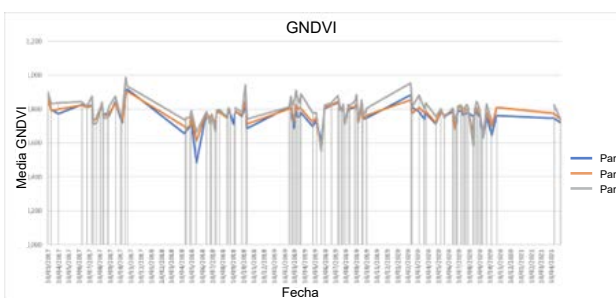


Figura 11. Serie temporal GNDVI para *Abies alba*.

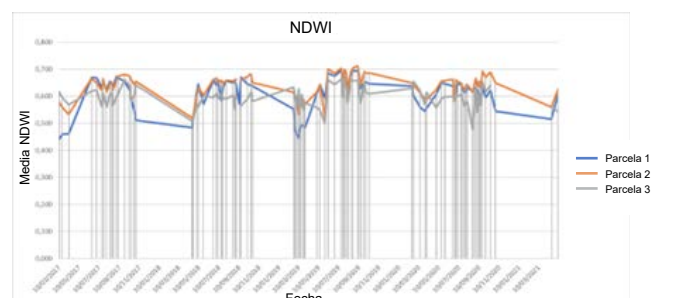


Figura 12. Serie temporal NDWI para *Abies alba*.

En las siguientes figuras se muestra la serie temporal (2017-2021) para los índices NDVI, kNDVI, GNDVI, NDWI para las tres parcelas para *Quercus petraea*.

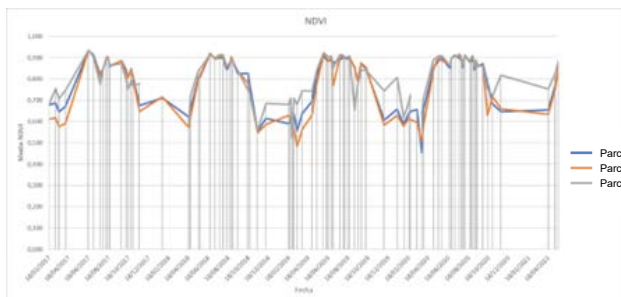


Figura 13. Serie temporal NDVI para *Quercus petraea*.

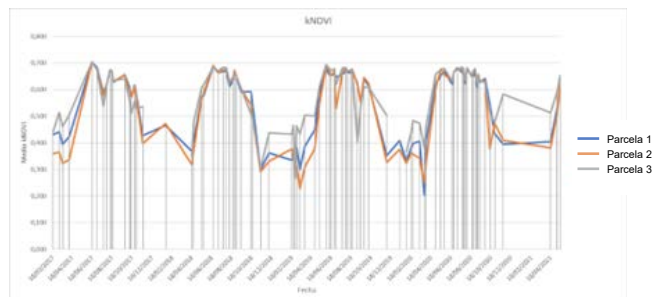


Figura 14. Serie temporal kNDVI para *Quercus petraea*.



Figura 15. Serie temporal GNDVI para *Quercus petraea*.

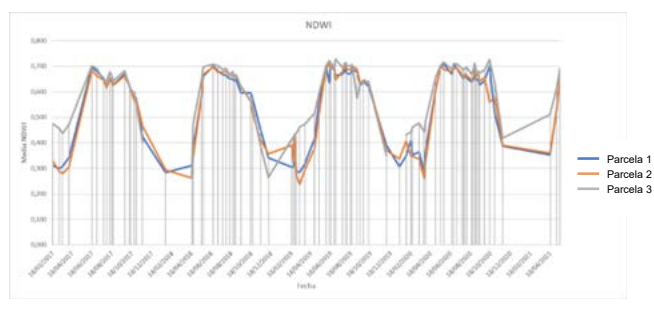


Figura 16. Serie temporal NDWI para *Quercus petraea*.

En las siguientes figuras se muestra la serie temporal (2017-2021) para los índices NDVI, kNDVI, NDWI para las tres parcelas para *Pinus sylvestris*.



Figura 17. Serie temporal NDVI para *Pinus sylvestris*.

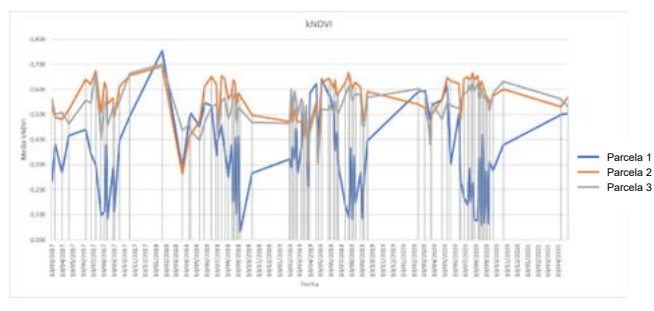


Figura 18. Serie temporal kNDVI para *Pinus sylvestris*.



Figura 19. Serie temporal GNDVI para *Pinus sylvestris*.

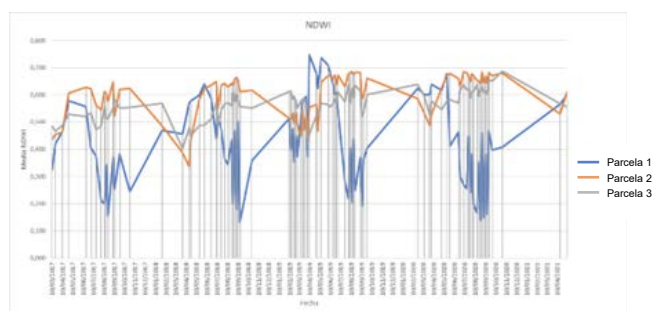


Figura 20. Serie temporal NDWI para *Pinus sylvestris*.

2. Correlación de los datos de campo con los índices de vegetación

Las tablas que se presentan a continuación muestran los valores de correlación lineal obtenidos para

especie forestal, entre el grado de brotación observado en campo para cada parcela y los valores de los IV derivados de las imágenes Sentinel-2.

Conclusiones y líneas futuras

La teledetección da solución al problema de accesibilidad de ciertas áreas objeto de estudio que son de difícil acceso o incluso inaccesibles. Asimismo, da solución a la observación subjetiva de los datos recogidos en campo, disminuyendo el error en la toma de datos. Por ello, es interesante el estudio del posible alcance de los sensores remotos en análisis medioambientales.

Según los resultados obtenidos en este trabajo, podemos concluir que la teledetección óptica permite un seguimiento de la fenología, sobre todo para las especies forestales de hoja caduca, ya que las series temporales de las especies *Fagus sylvatica* y *Quercus petraea* presentan ciclos fenológicos acentuados.

Del mismo modo, se han obtenido altas correlaciones entre los datos obtenidos en campo y los datos derivados de las imágenes Sentinel-2 para dichas especies.

Por el contrario, las especies *Abies alba* y *Pinus sylvestris* no presentan series temporales acentuadas

ni valores de correlación altos lo que indica que estas imágenes no aportan información relevante para este tipo de especies forestales de hojas perennes.

Hay que tener en cuenta que el periodo temporal con el que se trabaja es muy reducido, tan solo de 5 años, desde 2017 hasta 2021, por lo que sería conveniente realizar un estudio con un espacio temporal más amplio.

Asimismo, se han perdido muchos datos de las imágenes de teledetección óptica debido a que son zonas con mucha nubosidad y éstas se ven muy influenciadas por el estado atmosférico.

Por ello, una línea futura de investigación podría ser el aporte de información complementaria que nos pueden ofrecer las imágenes radar ya que este tipo de información no se ve afectada por las condiciones atmosféricas, como la nubosidad, obteniendo así información en las fechas en las que la teledetección óptica no puede aportar datos.

Fagus sylvatica		NDVI	kNDVI	GNDVI	NDWI
Parcela 1	Media	0,748	0,745	0,495	0,565
	Moda	0,754	0,751	0,480	0,616
	Media ponderada	0,876	0,875	0,692	0,571
Parcela 2	Media	0,829	0,824	0,559	0,484
	Moda	0,821	0,815	0,517	0,492
	Media ponderada	0,861	0,863	0,693	0,473
Parcela 3	Media	0,767	0,619	0,549	0,494
	Moda	0,713	0,563	0,437	0,455
	Media ponderada	0,485	0,519	0,485	0,365

Abies alba		NDVI	kNDVI	GNDVI	NDWI
Parcela 1	Media	0,354	0,347	0,208	0,735
	Moda	0,377	0,371	0,216	0,754
	Media ponderada	0,304	0,295	0,305	0,560
Parcela 2	Media	0,313	0,304	0,157	0,653
	Moda	0,329	0,320	0,171	0,652
	Media ponderada	0,275	0,262	0,246	0,508
Parcela 3	Media	0,228	0,219	-0,256	0,508
	Moda	0,208	0,199	-0,064	0,477
	Media ponderada	0,172	0,155	-0,078	0,502

Quercus petraea		NDVI	kNDVI	GNDVI	NDWI
Parcela 1	Media	0,786	0,791	0,375	0,821
	Moda	0,750	0,754	0,341	0,782
	Media ponderada	0,897	0,899	0,619	0,935
Parcela 2	Media	0,838	0,840	0,589	0,832
	Moda	0,820	0,821	0,578	0,805
	Media ponderada	0,903	0,906	0,708	0,904
Parcela 3	Media	0,734	0,738	0,468	0,733
	Moda	0,766	0,770	0,513	0,773
	Media ponderada	0,786	0,785	0,596	0,731

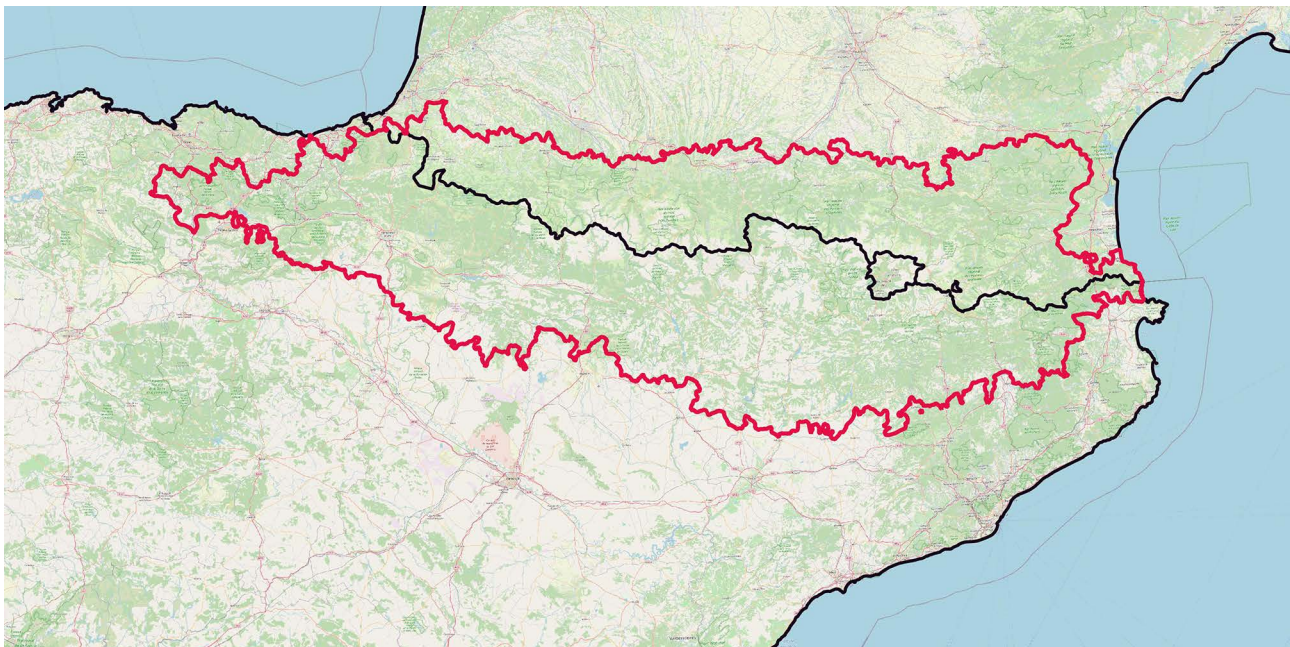
Pinus sylvestris		NDVI	kNDVI	GNDVI	NDWI
Parcela 1	Media	0,1779	0,1782	0,1296	0,0381
	Moda	0,2019	0,2024	0,1659	0,0499
	Media ponderada	0,2733	0,2749	0,1989	0,0709
Parcela 2	Media	0,6523	0,6520	0,6364	0,6334
	Moda	0,6685	0,6687	0,6586	0,6428
	Media ponderada	0,3934	0,3935	0,4261	0,2944
Parcela 3	Media	0,3067	0,3083	0,1349	0,3699
	Moda	0,2770	0,2787	0,1002	0,3648
	Media ponderada	0,2047	0,2064	0,0664	0,1604

Tabla 2. Correlación de los datos de observación de fenología en cada parcela y los diferentes índices de vegetación.

EJEMPLO DE USO DE TELEDETECCIÓN EN CATALUÑA: SEGUIMIENTO DE LA VIGOROSIDAD DE LA VEGETACIÓN (NDVI)



Interreg
POCTEFA



Introducción

La evidencia disponible muestra que el cambio climático es un fenómeno que cambiará el paisaje. La adaptación al cambio marcará la distribución espacial de las especies y características de las masas forestales. Uno de los objetivos actuales de los gestores del territorio es definir estrategias de gestión para adaptarse a los cambios y reducir la vulnerabilidad de los bosques. Una de las mejores formas de analizar lo que está sucediendo en la tierra es adquirir una mejor perspectiva desde el espacio. Las tecnologías desarrolladas en torno a la teledetección con imagen satélites, junto con los datos LIDAR, ofrecen vías de investigación y diagnóstico en el mundo forestal.

El análisis elaborado en este estudio se inspira en la metodología de análisis de las masas forestales llevadas a cabo en la comarca del Maresme (Tardà *et al.* 2017; Tardà y Riera 2018), que se basa en el análisis de imágenes satélite, para localizar aquellas zonas en las que la superficie forestal presenta una pérdida de vigorosidad o una mejora de ésta.

Este estudio pretende ser un ejercicio de fácil acceso y tratamiento de análisis de los datos disponibles en Cataluña y aportar información práctica en la toma de decisiones de la gestión forestal. Se toma como ámbito de estudio el ámbito correspondiente al Plan Director Urbanístico (PDU) del embalse de Rialb.

Metodología

La misión Copernicus de la Agencia Espacial Europea nos proporciona imágenes multispectrales con una periodicidad aproximada de dos imágenes por semana gracias a los satélites que forman la constelación Sentinel. En este trabajo se han utilizado las **imágenes capturadas por los satélites Sentinel-2** que graban imágenes mediante un sensor multispectral. La combinación de las bandas nos permite elaborar distintos índices que facilitan el análisis de la vegetación existente. En este estudio se ha utilizado el índice de detección de la vigorosidad de la vegetación o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Este índice depende del nivel de intensidad en la reflectancia y de la diferencia entre las bandas del Infrarrojo cercano y la del color rojo:

$$\text{NDVI} = (\text{infrarrojo cercano} - \text{rojo}) / (\text{infrarrojo cercano} + \text{rojo})$$

Esta relación muestra el estado de la vigorosidad de la vegetación en un rango de -1 (no vegetación/agua-nieve) hasta 1 (vegetación muy densa y vigorosa). En este estudio se han utilizado los datos elaborados por el Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC) que elabora una imagen mensual a partir de los datos sentinel-2 y pone a disposición pública en su sitio web.

Esta imagen está supeditada a la disponibilidad ya que las no deben contener excesivos elementos atmosféricos que dificulten la visión del territorio.

Junto con las imágenes satélite se ha utilizado otra fuente cartográfica: **el segundo vuelo LIDAR**, del año 2016, del ICGC. Con el objetivo de identificar la cubierta forestal arbolada se realiza un tratamiento de los datos LIDAR con el programa *fusion* para elaborar un modelo digital de vegetación analizando el recubrimiento y altura dominante. Se elabora una imagen de 10 metros de lado de píxel identificando las zonas con un recubrimiento superior al 5% y una altura dominante superior a los 3 metros respecto al nivel del suelo. Para determinar la distribución de las especies forestales se utiliza el mapa de cubiertas del suelo de Cataluña (CREAF, versión 4 2009).

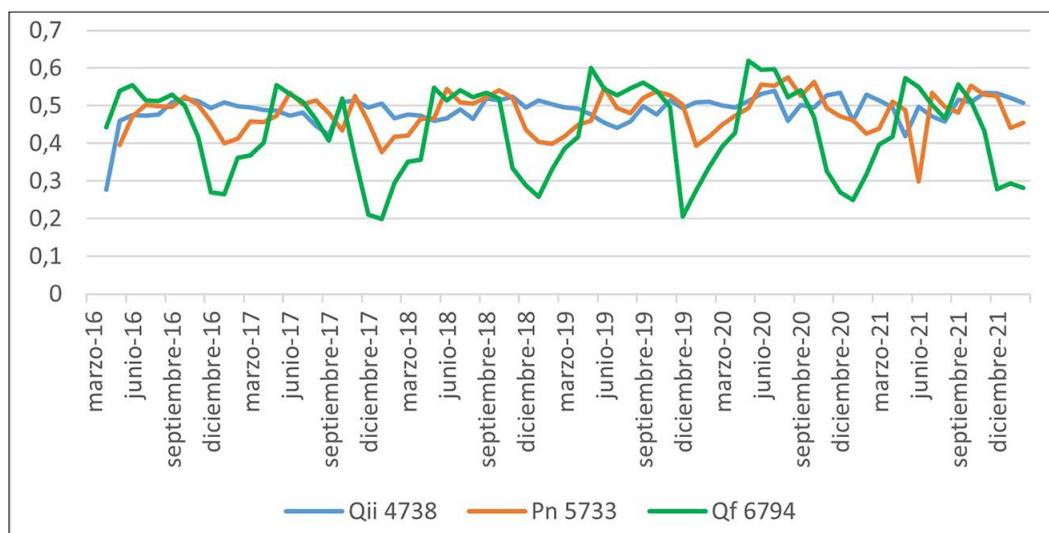
Se han analizado datos por 3 especies: *Pinus nigra*, *Quercus ilex* y *Quercus faginea*.

1. Análisis estadístico de series temporales de valores del NDVI.
2. Análisis gráfico comparativo de los valores del NDVI de los mismos meses en años diferentes.

Análisis del índice NDVI mensual por especies

Para analizar la serie temporal de datos se han calculado la media de los valores del NDVI por cada mes en tres fincas y en tres especies diferentes en un período de 5 años entre marzo de 2016 y febrero de 2022. La gráfica permite observar los distintos ciclos fenológicos de las especies y comparar los valores de los ciclos anuales.

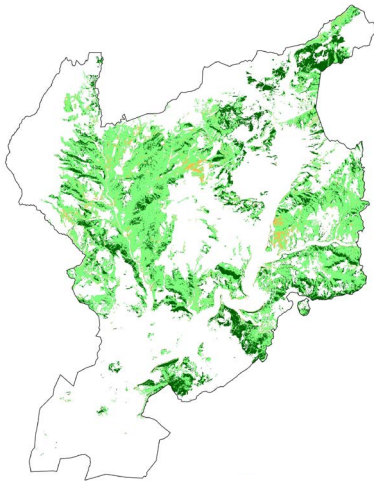
Evolución NDVI



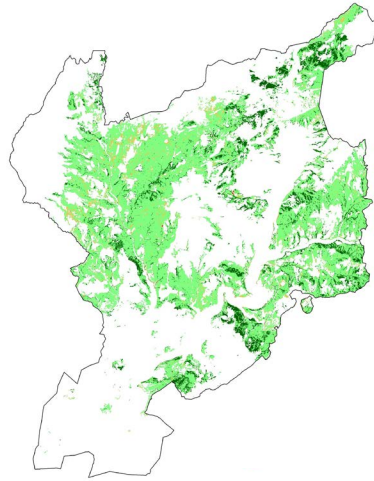
Comparativa gráfica del índice NDVI

La segunda propuesta metodológica estudiada ha sido el análisis y comparación gráfica de los valores del NDVI en los mismos meses y por años distintos. El objetivo del análisis es localizar aquellas zonas que se encuentren en decaimiento o mejora de la vigorosidad de la masa forestal. Se ha elaborado cartografía para *Pinus nigra* con los valores del índice NDVI de los meses de mayo. La representación de la información se realiza de acuerdo con la siguiente paleta de colores que permite visualizar fácilmente la vigorosidad de la vegetación:

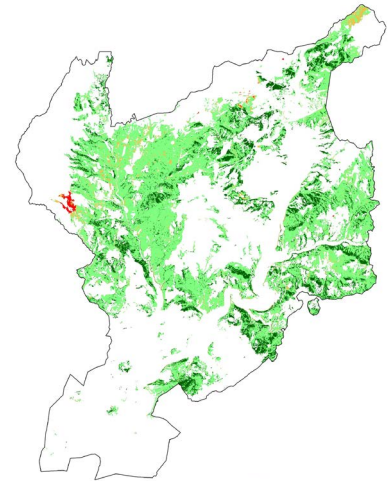
- $NDVI < 0$: correspondiente a agua o cubiertas artificiales, sin color.
- $0 < NDVI < 0.2$: correspondientes a suelo desnudo o vegetación muerta, color rojo.
- $0.2 < NDVI < 0.4$: correspondientes a vegetación abundante y vigorosa, de color verde claro.
- $NDVI > 0.6$: correspondientes a vegetación muy densa y vigorosa, de color verde oscuro.



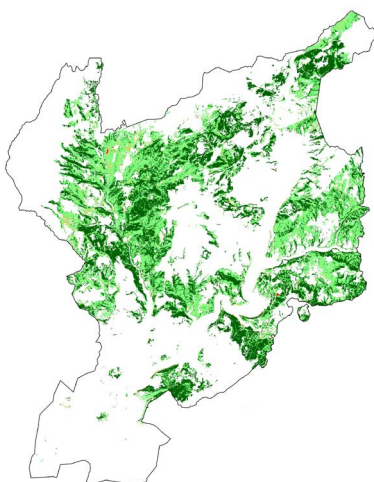
Pinus nigra NDVI Mayo 2016.



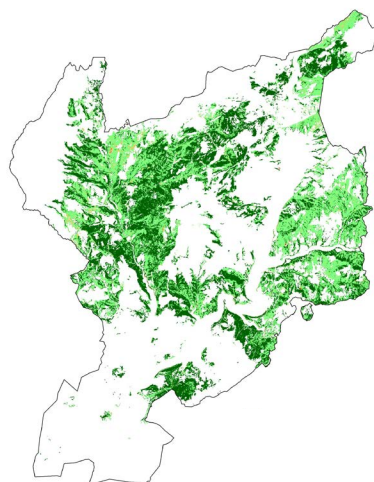
Pinus nigra NDVI Mayo 2017.



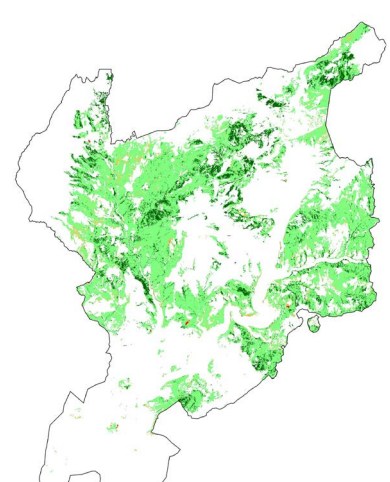
Pinus nigra NDVI Mayo 2018.



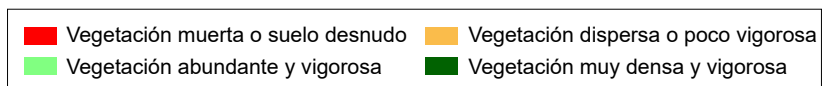
Pinus nigra NDVI Mayo 2019.



Pinus nigra NDVI Mayo 2020.



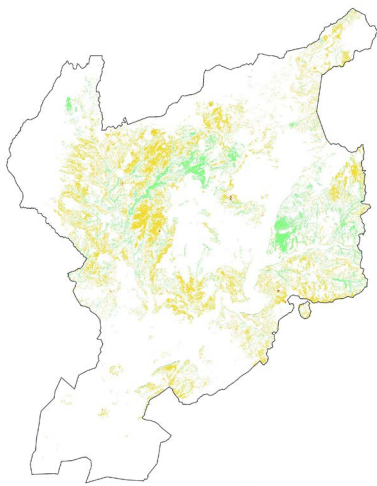
Pinus nigra NDVI Mayo 2021.



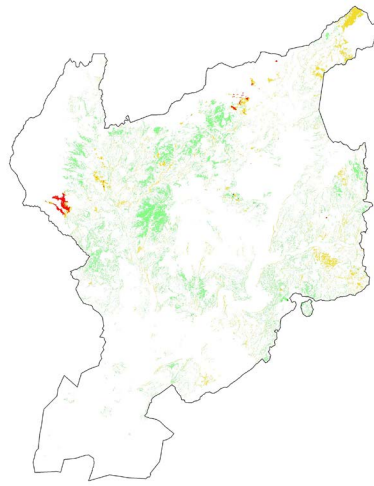
Restando los valores NDVI del año anterior podemos realizar una comparativa entre los meses de mayo de los diferentes años y visualizar la pérdida o mejora de la vigorosidad. La representación de la información se realiza de acuerdo con la siguiente paleta de colores:

- -1 a -0,3: Decaimiento de la vigorosidad, de color rojo.
- -0,3 a -0,5: Decaimiento moderado de la vigorosidad, de color naranja.

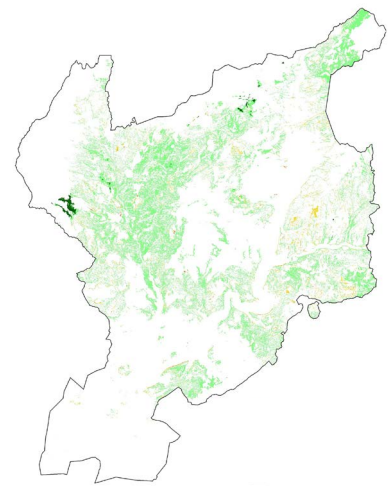
- -0,05 a 0,05: Sin cambios, de color blanco.
- 0,05 a 0,3: Incremento moderado de la vigorosidad, de color verde claro.
- 0,3 a 1: Fuerte incremento de la vigorosidad, de color verde oscuro.



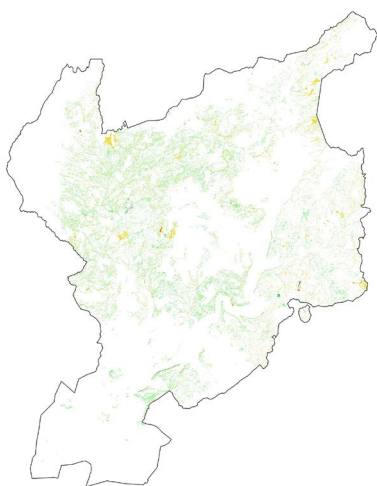
Pinus nigra NDVI. Mayo 2017 - Mayo 2016.



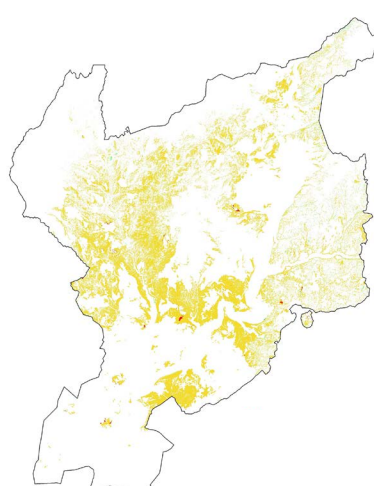
Pinus nigra NDVI. Mayo 2018 - Mayo 2017.



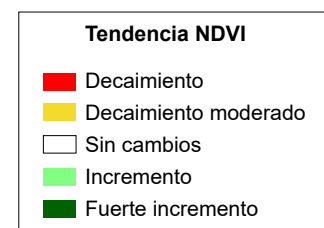
Pinus nigra NDVI. Mayo 2019 - Mayo 2018.



Pinus nigra NDVI. Mayo 2020 - Mayo 2019.



Pinus nigra NDVI. Junio 2021 - Mayo 2020.



Discusión y conclusiones

Los datos de los satélites sentinel que ofrece el programa Copernicus son una fuente de observación de la tierra con un gran potencial de análisis que hoy en día es ya una realidad.

Se podrían incluir varios factores en el análisis de los datos realizado que seguro enriquecerían los resultados. Las condiciones morfológicas del terreno (altura, orientación y pendiente de las vertientes), datos meteorológicos, especialmente la pluviometría mensual, así como alteraciones de las masas forestales (incendios, actuaciones forestales, afectaciones, etc.) podrían tenerse en cuenta en futuros análisis de los datos en función de la escala de trabajo.

Cabe remarcar que los resultados obtenidos deben entenderse como un primer acercamiento a este tipo de análisis y que se ha realizado con el objetivo de conocer los datos disponibles y las metodologías utilizadas. Los resultados muestran vías de interesantes análisis que permiten conocer mejor el territorio. En un futuro próximo, cuando se dispongan de series temporales más largas, es posible que se puedan encontrar líneas de tendencia del comportamiento de la vegetación útiles para entender la adaptación a los cambios del clima y tomar decisiones en el ámbito de la gestión forestal que permita mitigar sus efectos.





EJEMPLO DE USO DE LA TELEDETECCIÓN EN EL PAÍS VASCO:

SEGUIMIENTO DE LA DEFOLIACIÓN EN PINARES



A lo largo del año 2018 se produjo un fuerte ataque de defoliación en los pinares vascos, causado por hongos y por una situación de alta humedad ambiental. Debido a ese problema, HAZI estableció un sistema de evaluación de los daños y de seguimiento de las masas afectadas basado en la teledetección mediante Sentinel2. Se pudo establecer gracias a los proyectos LIFE HEALTHY FOREST (noviembre 2015/abril 2019) e INNOBANDAS, “Proyecto innovador de Sanidad sobre Bandas de acículas de pinos en Cantabria, Navarra y País Vasco” (agosto 2018/septiembre 2020). El fin de ambos proyectos era determinar el tratamiento más eficiente y sostenible para controlar la enfermedad de las bandas de las acículas de los pinos, mediante la evaluación de métodos innovadores utilizados en otros

países, así como los desarrollados por centros de investigación de las regiones participantes.

La parte correspondiente a HAZI correspondió a la evaluación de la defoliación y medición de los resultados mediante teledetección a lo largo de los últimos años. El primer mapa de afección de agosto 2018 fue realizado dentro del proyecto LIFE HEALTHY FOREST. Desde la finalización de ambos proyectos, los mapas de evaluación de la defoliación han sido realizados por encargo de la Viceconsejería de Agricultura, Pesca y Política Alimentaria del Gobierno Vasco y han podido ser empleados en este proyecto POCTEFA ACCLIMAFOR, en aspectos como la fenología o el seguimiento del estado fitosanitario de bosques naturales.

Detección automática de pinares afectados: evolución temporal

Tras el fuerte ataque de defoliación por banda marrón registrado en el verano de 2018 en los pinares de radiata, se pudo comprobar en campo la buena correlación entre estado sanitario del pinar y valor del NBR. Por ello, se optó por emplear valores umbrales del citado índice para clasificar a la totalidad de los pinares adultos según su grado de afección en agosto 2018a) por los gestores forestales.

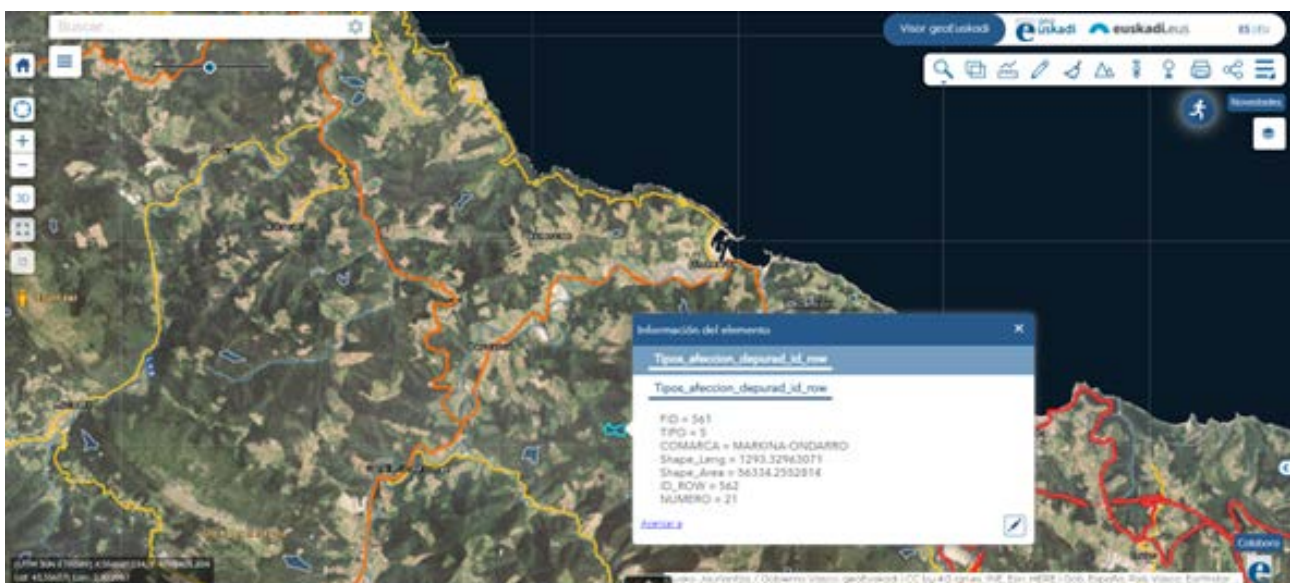
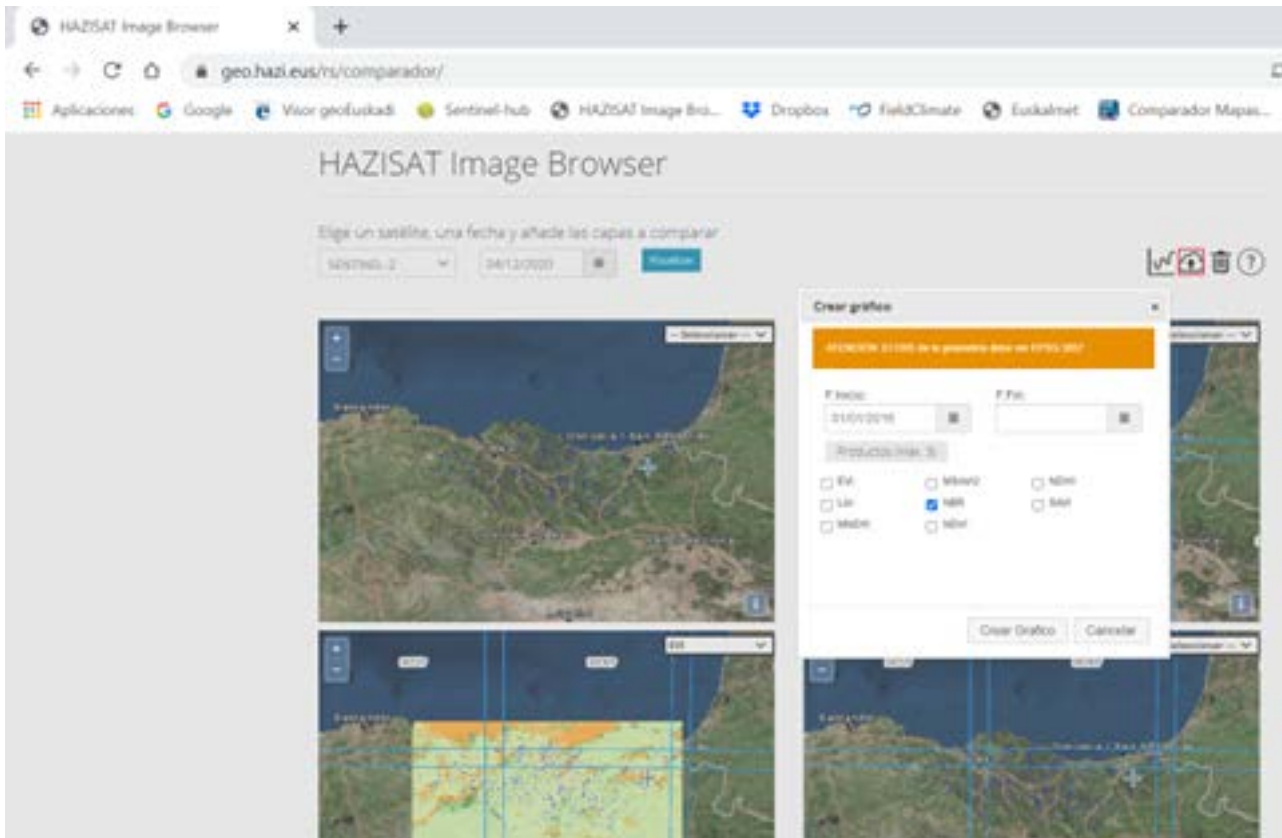
El índice NBR está directamente relacionado con la severidad de los daños en la vegetación

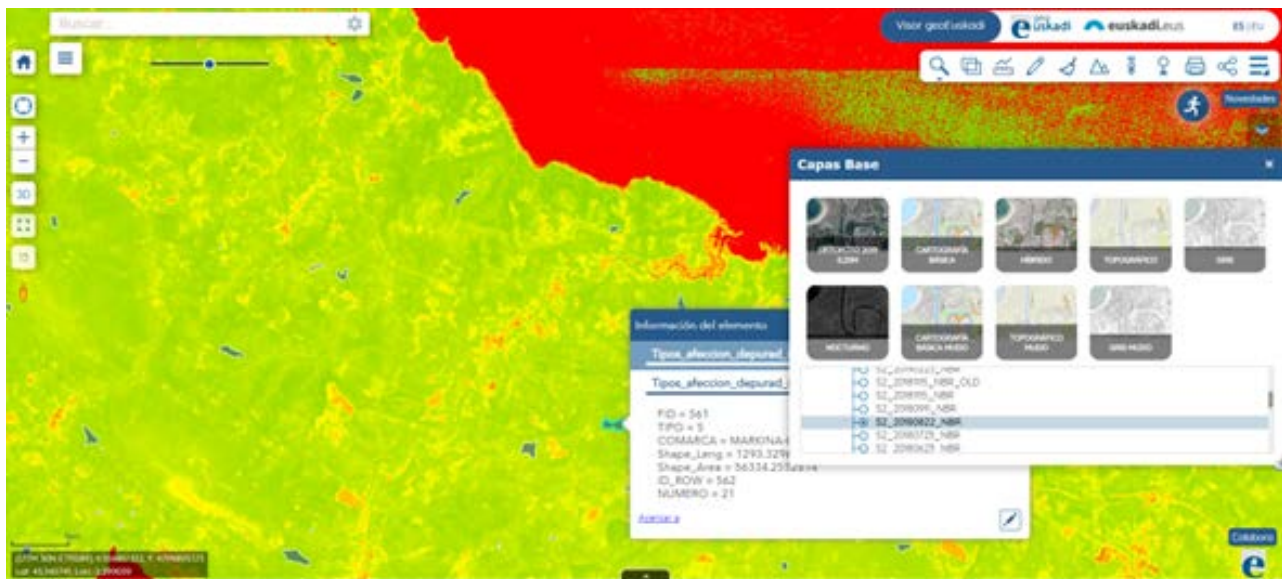
o en la pérdida de humedad en la cubierta arbórea superior. Según la metodología aplicada, el índice NBR adopta valores entre -1 y 1 o entre 0 y 20.000, rango de valores que relaciona la energía reflejada por la vegetación respecto a la energía solar incidente, empleando las bandas NIR (infrarrojo cercano, banda 8 de Sentinel2) y SWIR (infrarrojo de onda corta, bandas 10-11-12).

El método que se sigue desde entonces es elegir zonas de entrenamiento o parcelas representativas, tanto sanas como afectadas por proble-

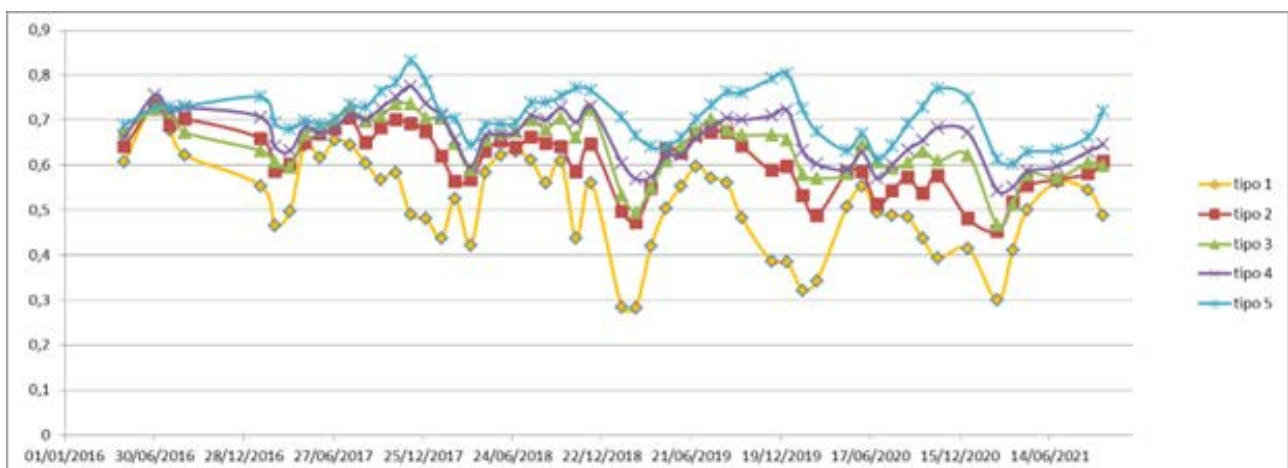
mas fitosanitarios, y emplear el visor HAZISAT Image Browser, creado por HAZI para comparar datos e imágenes satelitales de las constelaciones Landsat y Sentinel: <https://geo.hazi.eu/rs/>

comparador/. Este visor facilita imágenes para poder visualizar el índice NBR de esas zonas o parcelas a lo largo de los últimos años y los valores numéricos del citado NBR.

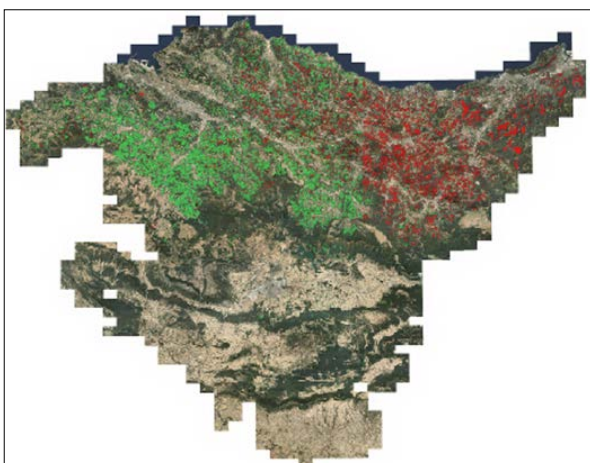




Ejemplo de zonas de entrenamiento seleccionadas en el visor GeoEuskadi, sobre la ortofoto 2019 y sobre el mapa NBR de agosto de 2018.



Variación mensual del NBR en zonas de entrenamiento de los pinares vascos a lo largo de los últimos años, siguiendo la clasificación en 5 tipos en cuanto a la defoliación estimada. Tipo 1 son los pinares con defoliación máxima y Tipo 5 sin los pinares sanos.



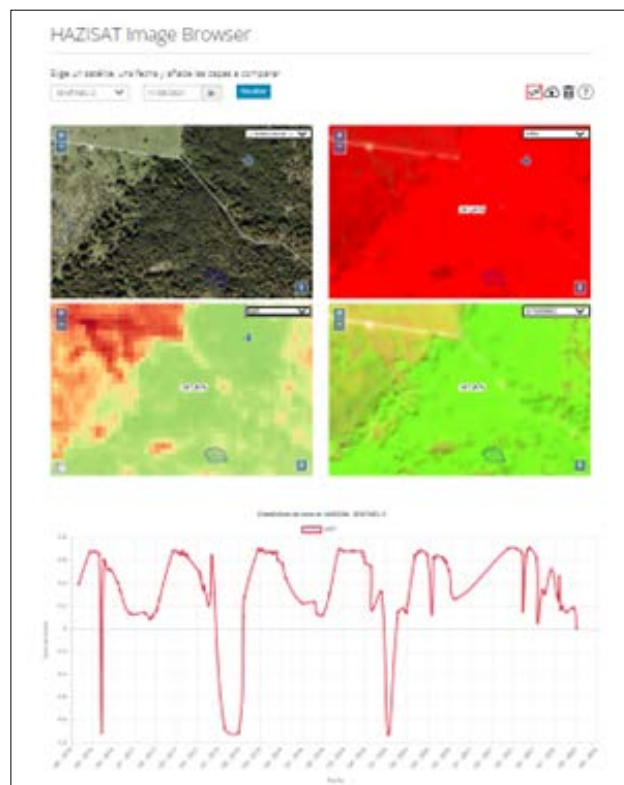
Mapa de afcción de los pinares-octubre 2021 (rojo=tipo 1 o defoliado, verde= tipo 5 o sano)

Aplicación al proyecto POCTEFA ACCLIMAFOR

El índice NBR ha demostrado su utilidad, no solo para analizar la severidad de los daños y la evolución de zonas quemadas, sino también en el análisis de la defoliación causada por agentes fitosanitarios o por agentes climatológicos (granizo, sequía, ...). Analizando el patrón anual del índice NBR en masas de diversas especies de interés en el País Vasco, se aprecia que los valores máximos del NBR en pinares adultos se producen en la segunda mitad del año. Y también se aprecia que el máximo de NBR en frondosas caducifolias se alcanza en verano, antes de comenzar el descenso por la caída de hojas otoñal.

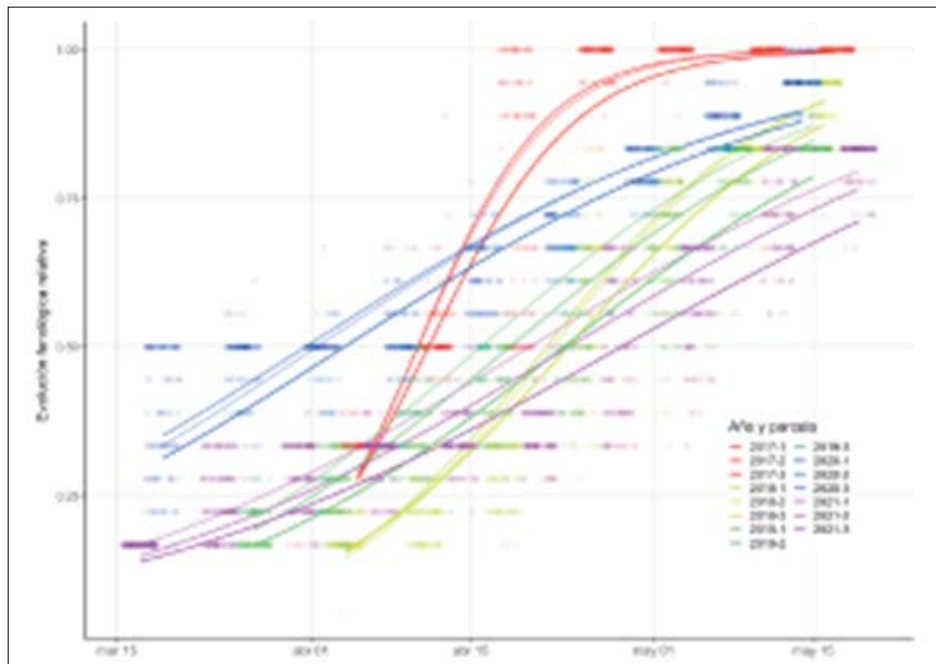
Por tanto, al igual que se ha hecho en los pinares, el visor permite cuantificar la evolución temporal del NBR (o de otros índices relacionados) a lo largo de varios años en todo tipo de bosques, con el fin de comprobar su evolución fitosanitaria o de detectar problemas en su estado vegetativo. Ya está siendo aplicado con éxito en hayedos puntisecos, como el analizado en la sierra de Entzia dentro del apartado de Gestión adaptativa de este proyecto.

Igualmente, se puede emplear el seguimiento del NBR para datar los periodos fenológicos de brotación y de caída de las hojas en los bosques naturales en grandes superficies. Al contar con los datos de campo de datación de los estados fenológicos de 108 hayas geolocalizadas en las 3 subparcelas de Opakua desde 2017, se puede correlacionar su estado con el NBR de tamaño pixel 10*10 m. Actualmente, se está trabajando en ello para automatizar este cálculo para grandes superficies de bosque y para minimizar los trabajos de campo. Hasta ahora, los resultados son prometedores.



Evolución del NBR en la parcela 2 de hayedo de Entzia, afectada de puntisecado progresivo.

Hay que tener en cuenta que también se cuenta con los datos climáticos continuos de la estación Euskalmet de Iturrieta, muy próxima a Opakua, lo que facilitará la correlación entre los estados fenológicos, los índices satelitales y la temperatura y precipitación. También se cuenta con el visor GeoEuskadi del Gobierno Vasco (<https://www.geo.euskadi.eus/webgeo00-bisorea/es/x72aGoeuskadiWAR/index.jsp>), donde se almacenan para su consulta y descarga otras fuentes de información geográfica suplementarias, como vuelos LiDAR, ortofotos anuales e imágenes satelitales libres de nubes.

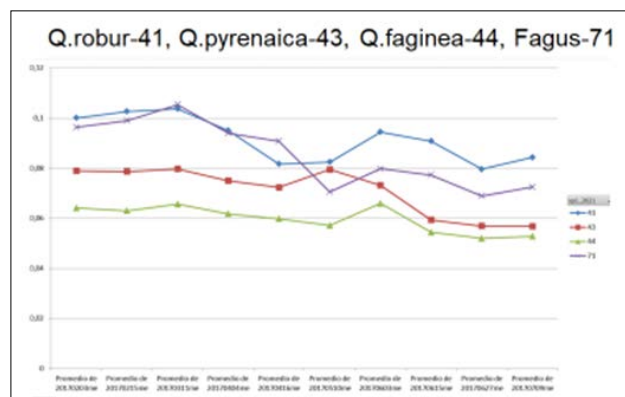


Evolución fenológica de las hayas de las 3 subparcelas de Opakua entre 2017 y 2021. El máximo (nivel 1.00) se alcanza cuando el 90% de las yemas de una haya han alcanzado el estado fenológico 5 en al menos un 90% de cobertura.

Nuevas vías de interés

Siendo Sentinel-2 una fuente de información gratuita y fácilmente disponible, sin embargo presenta el problema de que el cálculo del NBR requiere de imágenes satelitales primaverales y libres de nubes y nieblas, algo difícil en el País Vasco. Por tanto, hay que acudir a otras fuentes accesibles y complementarias.

El radar de Sentinel-1 podría ser una buena solución, ya que es independiente de las condiciones climáticas y suministra índices correlacionados con los estados fenológicos. Actualmente, HAZI está trabajando en este tema y también se están encontrando buenos resultados, a la espera de que diversos trabajos en marcha finalicen en breve.



Evolución de la retrodispersión VH media de un solo satélite de Sentinel-1 a lo largo del año 2017 en el País Vasco. Se distingue el descenso de VH en los bosques de especies caducifolias que brotan hacia marzo-abril, como el roble y haya, frente a las marcescentes, quejigos y rebollos, que viven en montes más fríos y suelen brotar a partir del mes de mayo.





CAMBIOS EN LA DISTRIBUCIÓN DE ESPECIES Y CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN. INFORMACIÓN Y HERRAMIENTAS DISPONIBLES



La distribución de una especie vegetal está determinada por la existencia a lo largo del tiempo de unas condiciones mínimas ecológicas que permitan su persistencia. Cada especie arbórea ocupa un nicho ecológico específico definido especialmente por sus condiciones edáficas, térmicas e hídricas. Esto explica, entre otras cosas, el escalonamiento de las especies forestales en un entorno de montaña.

Cuando no se reúnen las condiciones mínimas, la persistencia de la especie depende de la capacidad de migración a localidades favorables. Aunque las especies sean capaces de migrar para seguir su nicho ecológico, en el actual contexto de alteración climática acelerada existe la duda en cuanto a la capacidad de los árboles –inmóviles y longevos– de dispersarse a la misma velocidad con la que el clima evoluciona, especialmente en paisajes fragmentados.

Las especies vegetales también se adaptan a los cambios ecológicos modificando sus características morfológicas y fisiológicas. Esta variabilidad se conoce como plasticidad. Sin embargo, en algunos casos, actualmente es imposible saber si la plasticidad de las especies principales o secundarias de un rodal será suficiente para cubrir la variación del cambio climático en buenas condiciones fisiológicas.

A pesar de que no tenemos respuestas claras a todas estas preguntas, los silvicultores pirenaicos deben enfrentarse cada día a la toma de decisiones de gestión forestal. Como resultado, en colaboración con los investigadores, se van elaborando herramientas de apoyo y conocimientos teóricos y operativos. Se presenta, aquí, una visión general de las herramientas actualmente desplegadas a nivel de los Pirineos y que ya pueden ser utilizadas por los gestores forestales.

Cartografía

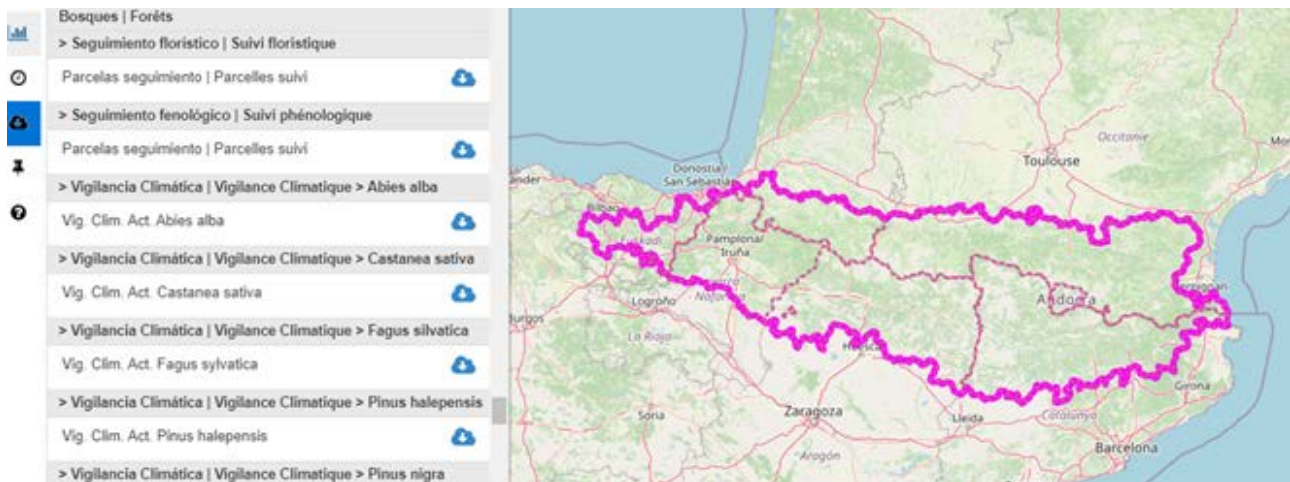
a) En el Pirineo

La cartografía es una herramienta valiosa que proporciona un acceso rápido a conocimientos geolocalizados y multifactoriales. En el marco del proyecto CANOPEE, se han elaborado **mapas de vigilancia climática relativa**. Tienen una resolución fina (50 m) y permiten poner de relieve las zonas susceptibles de ser o convertirse en las más sensibles al cambio climático para una especie determinada; y, al contra-

rio, identificar las zonas que le serían más favorables.

Estos mapas están disponibles en el **geoportal del OPCC**: <https://www.opcc-ctp.org/es/geoportal>.

En este portal se incluyen otros mapas, no dedicados al sector forestal pero de interés, como datos meteorológicos y florísticos.



Ubicación de los mapas de vigilancia climática en el geoportal del OPCC.

b) En Francia

El sitio web ClimEssences www.climesences.fr, ofrecido por la RMT AFORCE, proporciona una serie de ayudas para la elección de especies (especies de árboles forestales) en el contexto del cambio climático.

Las funcionalidades ofrecidas permiten mejorar el conocimiento de las especies, comprender la evolución del clima según diferentes escenarios de cambio climático, a escala de una región forestal y proporcionar herramientas para la reflexión sobre la elección de especies en un clima cambiante.

Se proponen dos enfoques complementarios: hojas de especies que reúnen el conocimiento disponible sobre las especies de acuerdo con 37 criterios, y el modelado cartográfico de la compatibilidad climática de las especies utilizando el modelo IKS.

c) En España

Atlas de idoneidad topoclimática (escala de 0 a 1) para las diferentes especies leñosas forestales.

Fuente: Ninyerola et al. (2010). Ninyerola M., Serra-Díaz J.M., Lloret F. 2010. Atlas de idoneidad topoclimática de leñosas. Servidor del Atlas de idoneidad topoclimática de leñosas - Spaineo Directory.

También existe información a **escala regional**. Por ejemplo, en **Navarra**, se identifica y cartografía la vulnerabilidad de los sistemas forestales. <https://lifeadapta.navarra.es/es/accion-c3.1> y en el **País Vasco**, mediante el visor del proyecto LIFE Healthy Forest <https://geo1.hazi.eus/healthy-forest/index.html> puede visualizarse la clasificación de los territorios forestales del País Vasco según 3 clases de aptitud para el pino silvestre: **Alta**, **Media** y **Baja**. En **Catalunya** se ha desarrollado cartografía específica para algunas formaciones, como los bosques subhúmedos mediterráneos (LIFE Mixforchange) o para los alcornoques en Cataluña (LIFE SUBER).

En Navarra, se están evaluando las principales amenazas, riesgos e impactos potenciales debidos al Cambio Climático para diferentes especies. Los datos y documentos oficiales, una vez publicados, se ofrecen en el siguiente repositorio documental: <https://tinyurl.com/y2hlsv3o>.





PINO SILVESTRE: AUTOECOLOGÍA Y COMPATIBILIDAD CLIMÁTICA ACTUAL Y FUTURA. PROBLEMAS DE REGENERACIÓN



Interreg
POCTEFA



Principios fundamentales

El área de distribución natural del pino silvestre (*Pinus sylvestris*) es muy amplia y abarca desde el sur de España hasta Manchuria, en China. Es una especie forestal resistente que puede soportar suelos pobres, poco profundos y ácidos. El pino silvestre soporta diversos climas y condiciones de suelo. Ni el frío ni las heladas primaverales le suponen un problema, pero sí las nevadas intensas y los vientos fuertes. Se encuentra principalmente en zonas montañosas y hasta los 2000 m de altitud, donde, mezclado con el pino negro (*Pinus uncinata*), puede hibridarse y formar el pino *Pinus x rhaetica Brügger*.

En los Pirineos, el abandono de la agricultura en el siglo XX ha provocado en gran medida su extensión en entornos agrícolas abandonados como especie

pionera y a plena vista. El pino silvestre es una especie importante en Cataluña, Navarra, Aragón y Andorra. En cambio, es menos importante en el País Vasco español y en los Pirineos franceses, salvo de forma local en los Pirineos catalanes en la vertiente francesa.

En los Pirineos sin influencia mediterránea, el pino silvestre suele estar más presente en las laderas orientadas al sur de la zona montañosa. Por otro lado, cuando la influencia mediterránea está presente, el pino silvestre prefiere las laderas frescas, mientras que en las laderas orientadas al sur comienza a aparecer el marchitamiento, especialmente en las zonas cálidas y secas de baja altitud.



Imagen de un regenerado de pino silvestre, después de una corta de regeneración por aclareo sucesivo uniforme en Cataluña.

Datos autoecológicos sobre el pino silvestre y su distribución actual

Pirineos con influencia mediterránea (parte de Navarra, Aragón, Cataluña, Pirineos orientales, parte del Aude)																		
Altitud																		
Orientación	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800
Fría																		
Cálida																		

Pluviosidad anual												
100	300	500	700	900	1100	1300	1500	1700	1900	2100	2300	2500

Pluviosidad estival (junio-julio-agosto)												
10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250 +

Pirineos sin influencia mediterránea (País Vasco, parte de Navarra, Pirineos Atlánticos, Altos Pirineos, Alto Garona, Ariège, parte del Aude)																		
Altitud																		
Orientación	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800
Fría																		
Cálida																		

Pluviosidad anual												
100	300	500	700	900	1100	1300	1500	1700	1900	2100	2300	2500

Pluviosidad estival (junio-julio-agosto)												
10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250 +

Orientación							
Norte	Noreste	Este	Sudeste	Sur	Sudoeste	Oeste	Noroeste
			*	*	*		

Viento	
Suave	Fuerte

Temperaturas límite soportadas	
T° mín.	T° máx.
-40° C	40° C

* En zonas más secas (influencia mediterránea)

Topografía						
Meseta	Cumbre	Alto de la ladera	Rellano	Medio de la ladera	Falda de la ladera	Valle

Pendiente		
Suave o nula	Media	Fuerte
0-30%	30-70%	>70%

Profundidad del suelo											
10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120 +

Carga en roca	
Baja (<30%)	Alta (>30%)

Textura								
S	SL	SA	L	LS	LA	A	AL	AS

Roca madre						
Esquisto	Gneis	Granito	Arenisca	Caliza	Calc. Activ.	Marga

Roca madre fisurada	
Si	No

Arcilla pesada:

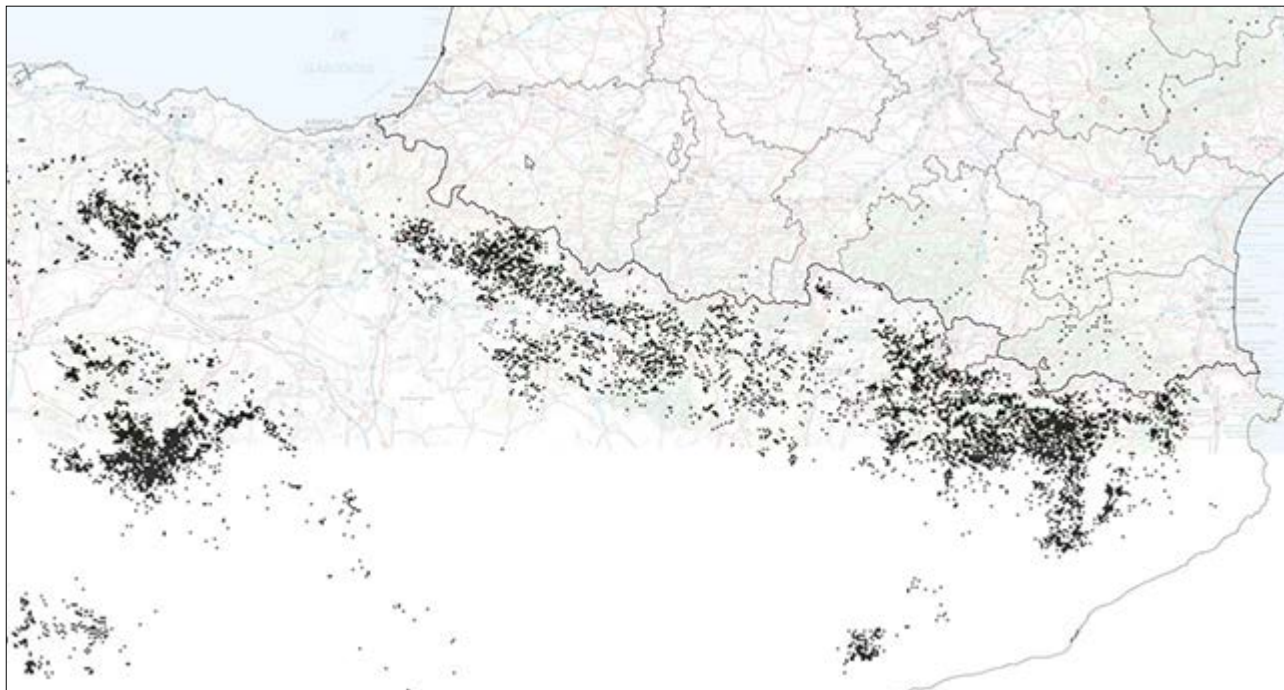
Compacidad			
Suelo blando	Suelo poco compacto	Suelo compacto	Suelo cementado, aliótico, endurecido

Hydromorfia	
Temporal	Permanente

Hipersecos XXX						
Muy secos XX						
Secos X						
Bastante secos x						
Bien drenados m						
Costos f						
Bastante húmedos h						
Húmedos x						
Empapado, inundado H						
Humedad ↑	Muy ácidos AA	Ácidos A	Bastante ácidos aa	Ligeramente ácidos a	neutros n	Calcarios b
Acidez →						

- Zonas favorables para el factor.
- Zonas límite para el factor, susceptibles de ser compensadas por otros factores con valores óptimos (verde).
- Zonas críticas para el factor que no se pueden compensar.
- Zonas con datos desconocidos o fuera de los límites de la zona estudiada.

La distribución actual del pino silvestre en los Pirineos según los inventarios forestales europeos es la siguiente:

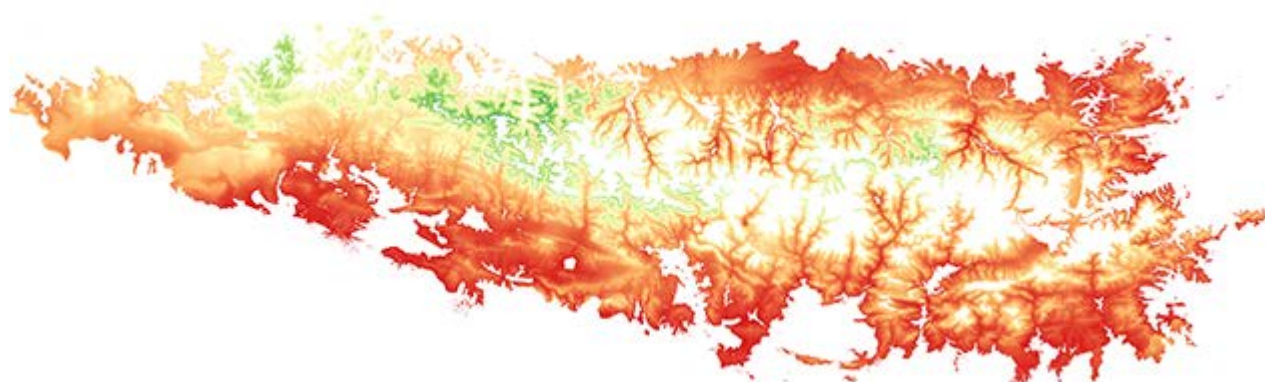


Compatibilidad climática actual y futura

Para evaluar la compatibilidad actual y futura del pino silvestre en una región determinada, existen diferentes mapas elaborados a distintas escalas. A escala regional, están disponibles los siguientes mapas:

- **A escala pirenaica: en el marco del proyecto POCTEFA CANOPEE, se han elaborado diferentes mapas de vigilancia actuales y futuros, disponibles en el geoportal del OPCC: <https://opcc-ctp.org/es/geoportal>.** Los mapas de Vigilancia Climática Actual (VCA) se obtuvieron por modelización estadística (enlace entre la distribución actual de los rodales donde la especie es mayo-

ritaria y las medias climáticas de 1981-2010, sobre la base del índice de Martonne y según la información disponible), cada **mapa de Vigilancia Climática Actual (VCA)** propone una vigilancia más estrecha en aquellos lugares en los que la especie está en un clima más cálido o más seco que en toda su área de distribución pirenaica. Dadas las variaciones y las incertidumbres climáticas, este mapa no garantiza la supervivencia de la especie ni la ausencia de decaimientos. En la figura a pie de página puede verse el Mapa de VCA descargable para pino silvestre.



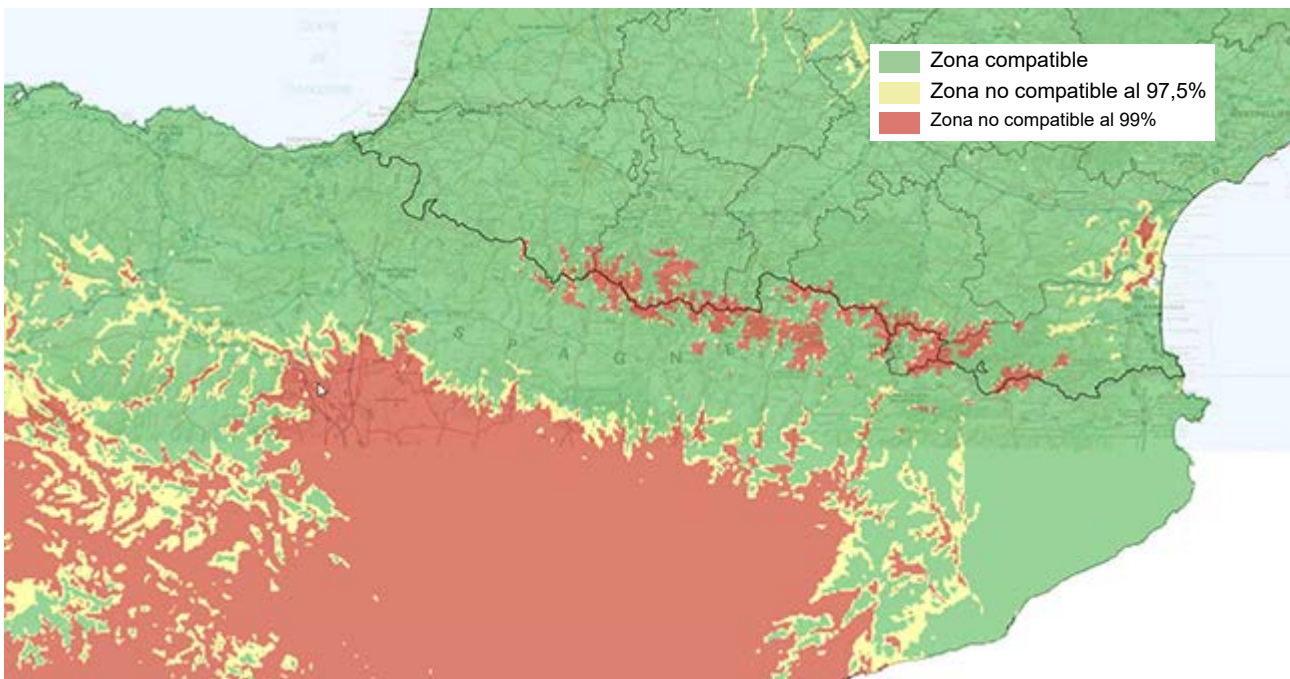
Los **mapas de Vigilancia Climática Relativa (VCR)** también pueden descargarse del geportal. Estos mapas se obtienen calculando el balance hídrico climático (P-ETP) que luego se recalcula (variable centrada reducida) para tener toda la gama de colores relativos. Los mapas de Vigilancia Climática Relativa permiten los mismos usos que los mapas de Vigilancia Climática actual pero integran mejor los efectos de pendiente ligados a la consideración de la evapotranspiración.

- **En Francia**, el sitio web ClimEssences (www.climessences.fr), propuesto por la RMT AFORCE, ofrece ayuda para la elección de especies forestales arbóreas objetivo en el contexto del cambio climático. Las funcionalidades ofrecidas permiten a los usuarios mejorar su conocimiento de las especies, comprender la evolución del clima según diferentes escenarios de cambio climático a escala de región forestal y proporcionar herramientas para reflexionar sobre la elección de especies en un clima cambiante. Los mapas de compatibilidad disponibles en ClimEssences se producen a partir de un cruce entre un mapa de la distribución actual de la especie en Europa y una explicación de la distribución actual según tres parámetros:

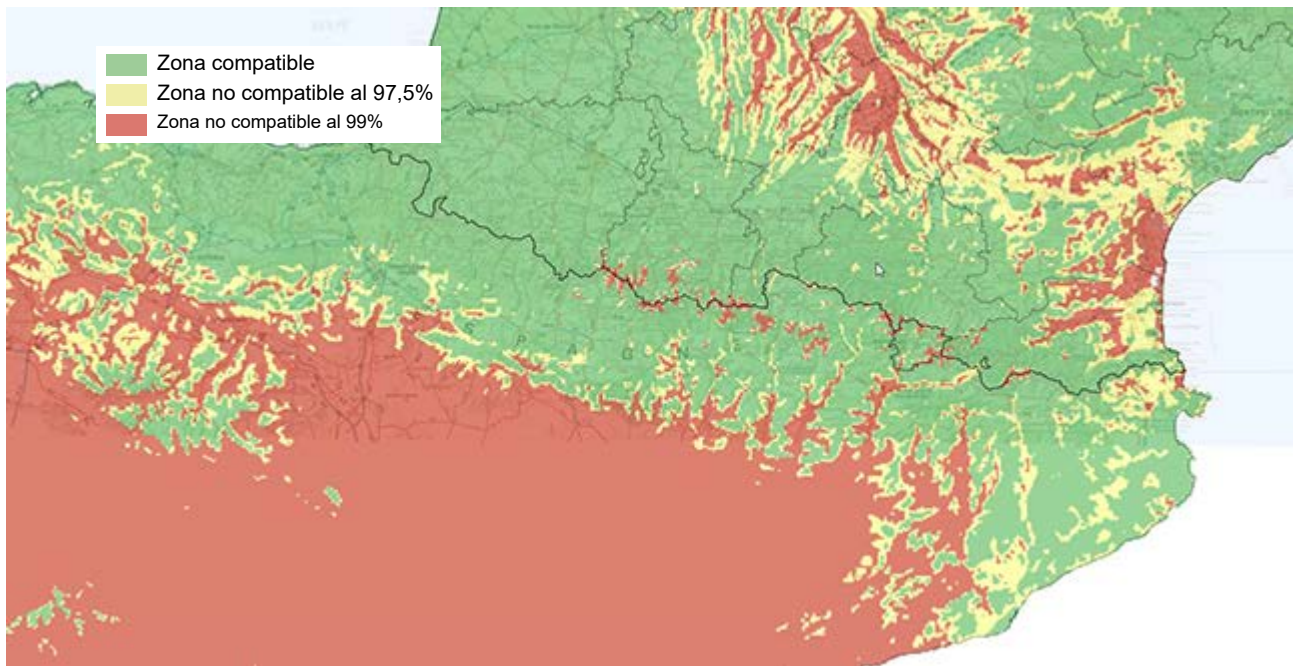
- **DHYa: déficit hídrico mensual acumulado P-ETP durante un año**, correspondiente al factor limitante de falta de agua,
- **TMIa: temperatura mínima anual**, correspondiente al factor limitante del exceso de frío,
- **SDJa: suma de los grados-día anuales**, correspondiente al factor limitante de la falta de calor.

Explicación de la simbología de los mapas:

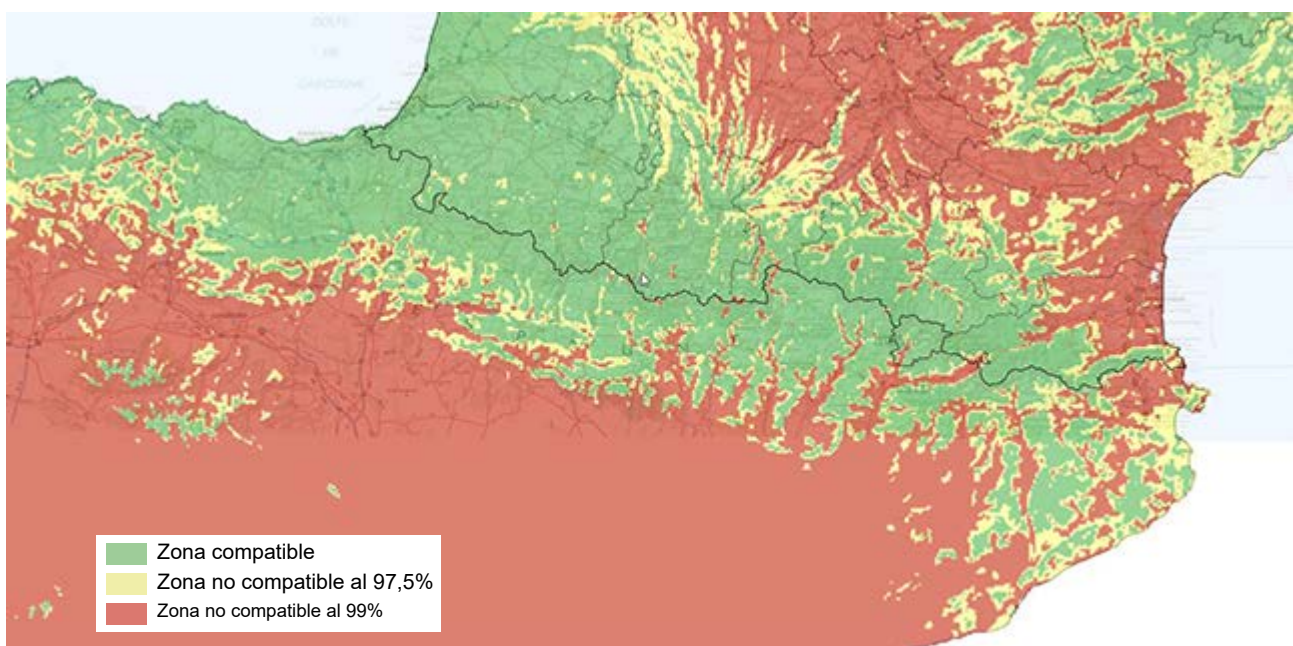
- **en verde** las zonas compatibles para un umbral del 97,5% de los puntos de presencia.
- **en amarillo**, las zonas que son compatibles para un umbral del 99% de los puntos de presencia, pero incompatibles para el umbral del 97,5%, y
- **en rojo**, las zonas incompatibles para un umbral del 99% de los puntos de presencia (y, por tanto, también incompatibles con un umbral del 97,5%).



Mapa de compatibilidad climática actual del pino silvestre según ClimEssences.



Mapa de compatibilidad climática del pino silvestre. Previsión 2070 (escenario RCP 4.5, media de los modelos) según ClimEssences.



Mapa de compatibilidad climática del pino silvestre. Previsión 2070 (escenario RCP 8.5, media de los modelos) según ClimEssences.

- **En España:** existe el **Atlas de idoneidad topoclimática** (escala de 0 a 1) desarrollado por el CREAM para las diferentes especies leñosas forestales y disponible aquí: <https://www.opengis.grumets.cat/IdoneitatPI/Index.html> (ver ficha 3.4, con un ejemplo en Cataluña).

Para obtener más explicaciones sobre los mapas de compatibilidad y su significado, puede consultarse el sitio web www.climesences.fr en la pestaña "com-

patibilités climatiques/cartes de compatibilité multi-seuils" ("compatibilidades climáticas/mapas de compatibilidad de umbrales múltiples").

Problemas de regeneración del pino silvestre. Adaptación de las cortas

A veces, la regeneración del pino silvestre resulta complicada, como suele ocurrir con otros pinos. Para lograr una buena regeneración, además de un buen conocimiento autoecológico de la especie, es necesario adaptar el método de regeneración en función de los desafíos concretos de cada caso. Por lo general, cuanto menos gruesos sean los suelos, más fácil resultará regenerar un rodal de pinos.

Diferentes métodos de regeneración que se pueden emplear

Sea cual sea el método de regeneración, y como requisito previo a cada intervención, es necesario valorar la necesidad de instalar vallado para proteger el suelo y los plantones.

- **Regeneración por corta de diseminación:**

Este es el método de regeneración que parece más eficaz para garantizar la regeneración natural, teniendo en cuenta la evolución del clima.

Para limitar el riesgo de ausencia de regeneración, según el contexto, se puede decidir empezar con una corta de diseminación que provoque la llegada de plántulas con la puesta en luz. Si las plántulas no se instalan rápidamente, haber dejado árboles semilleros permite esperar la llegada de regeneración a partir de producción de semillas por parte de los semilleros restantes. La intensidad de la corta de diseminación debe ser alta para aportar suficiente luz al suelo. Dejar árboles semilleros no garantiza la regeneración al 100 %, pero limita el riesgo de fracaso. Una vez lograda la regeneración, se cosechan los últimos semilleros.

- **Regeneración por bosquetes:**

En el monte alto regular:

Este método de regeneración se basa en el carácter heliófilo del pino silvestre. La corta corresponde a varios bosquetes abiertos en el rodal y espaciados entre sí. Cada bosquete consta de una superficie inferior a 0,5 ha, y se cortan todos los pinos dentro de los bosquetes delimitados, mientras que en la zona entre bosquetes no se corta ningún árbol. En cuanto los bosquetes em-

piezan a regenerarse, se abren otros nuevos en el rodal. Por lo tanto, el periodo entre cortas suele ser corto para obtener un rodal regular, siempre y cuando la regeneración sea rápida.

En el monte alto irregular:

El principio es el mismo, pero el ritmo de las rotaciones es más lento, ya que a menudo se trata de una gestión extensiva en la que las diferencias de edad entre los bosquetes no resultan molestas.

- **Regeneración por corta a tala rasa:**

Esta técnica de regeneración se ha empleado ampliamente en el pasado para el pino silvestre, pero actualmente está mostrando sus límites con las dificultades de regeneración observadas, probablemente a causa del cambio climático. La técnica de regeneración por corta a tala rasa consiste en cortar todos los árboles de un rodal determinado, que puede ser muy adecuado para la regeneración de pinos como especie de luz. Sin embargo, si la regeneración no se produce rápidamente, será muy difícil conseguir una regeneración a largo plazo, y será necesario plantar si se quiere conseguir una cubierta leñosa.

Posibilidad de mantener los árboles semilleros en exceso una vez finalizada la regeneración

Cuando la regeneración tarda en afianzarse y no queremos realizar trabajos de fomento de plántulas o de plantación, cabe la posibilidad de dejar semilleros en sobre-reserva a largo plazo para que sigan aportando semillas y regeneren poco a poco el rodal. Después, para estos árboles existen dos posibilidades:

- o bien se cortan en una fase mucho más tardía durante la siguiente tala, cuando las plántulas se han convertido en árboles,
- o se dejan como árboles para la biodiversidad hasta su senescencia (con vigilancia por riesgo de incendio).

La densidad de las sobre-reservas que quedan es de unos 20 a 30 árboles semilleros por hectárea.

Trabajos preliminares para fomentar la llegada y la conservación de la regeneración

En el caso de rodales de buena calidad, o de rodales que requieran una regeneración completa (p. ej., protección contra riesgos naturales), puede ser necesario realizar trabajos para favorecer la llegada de plántulas. Como el pino silvestre es una especie que se regenera más fácilmente en suelos desnudos o poco densos, principalmente se pueden realizar dos tipos de trabajos previos:

Desbroces y claras:

Si hay un sotobosque, sobre todo de hoja caduca, lo ideal es cortarlo previamente, ya sea en forma de resalveo o en forma de matarasa. Las islas de frondosas preexistentes pueden mantenerse para fomentar la mezcla para la protección de la biodiversidad y para facilitar la resistencia frente a perturbaciones.

Laboreo del suelo:

El objetivo es trabajar el suelo para dejar al descubierto parte de él, ya sea como operación de laboreo adicional mediante escarificación mecanizada o durante el desembosque, removiendo la capa superficial del suelo al arrastrar los restos de copas o las ramas. Por ejemplo, si la regeneración es por bosquetes la corta se concentra en una pequeña zona sin tener que hacer ningún trabajo posterior. La recogida implica el laboreo superficial del suelo por el arrastre de los troncos. El laboreo del suelo median-

te desembosque no es tan eficaz como la escarificación mecanizada, pero es «gratis».

No es necesario trabajar el suelo en su totalidad, por razones de coste, pero también para favorecer la dinámica natural. Para ello, se puede trabajar por parcelas a ambos lados de las vías de desembosque abiertas por la maquinaria forestal (como por ejemplo la miniexcavadora).

El principio de la gestión extensiva

En los lugares con menor fertilidad, no se puede llevar a cabo una silvicultura de producción clásica con grandes inversiones. Así pues, la opción es realizar una gestión extensiva basada en la oportunidad económica de la corta, de forma que se limitan las inversiones, pero también se asegura la renovación de los rodales. En la gestión extensiva, el silvicultor abandona toda posibilidad de mejorar los rodales. La silvicultura se centra en la recolección. Sin embargo, es importante que la recolección no ponga en peligro la renovación de los rodales, de forma que exista la posibilidad de una regeneración a largo plazo. El principio de la gestión extensiva se materializa en el mantenimiento de los árboles semilleros a largo plazo después de la recolección:

- bien de forma difusa en el rodal,
- o bien espaciando las cortas en bosquetes, de forma que se deje tiempo para que estos bosquetes se regeneren (principio de regeneración por bosquetes en el monte alto irregular).

Más información sobre el pino silvestre

Fichas 3.2, 3.3 y 3.4, con información sobre las principales amenazas y retos de gestión del País Vasco, Navarra y Catalunya, respectivamente.



EL PINO SILVESTRE (*Pinus sylvestris*) EN EL PAÍS VASCO: AUTOECOLOGÍA, AMENAZAS Y ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN



Interreg
POCTEFA



El Pino silvestre o albar (*Pinus sylvestris*) es la principal especie conífera de origen natural en el País Vasco. El mapa forestal 2020 asigna a esta especie 17.468 ha, de ellas 14.000 ha en forma de masas naturales y unas 3.400 como repoblaciones forestales. Después del pino radiata, el pino silvestre es la conífera de mayor extensión en el País Vasco.

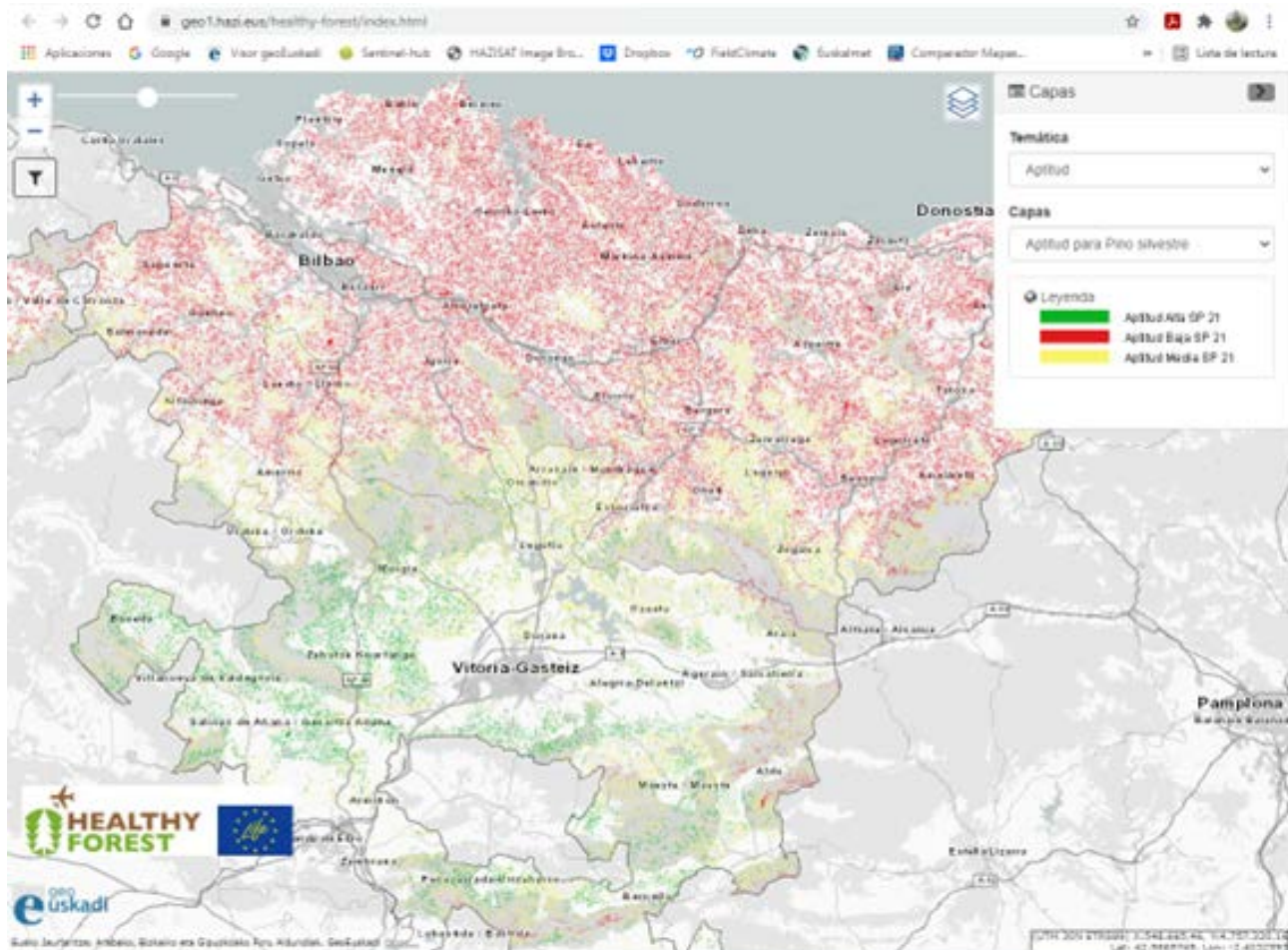
Sus principales masas se ubican en el Territorio de Álava, en el extremo suroccidental vasco. Los mejores pinares vascos se ubican en la sierra de Artzena, que forma parte del gran macizo de pino silvestre natural de las montañas calizas de la cabecera del río Ebro.

Ecología / requerimientos

En el marco del proyecto LIFE Healthy Forest (2015/2019), HAZI realizó diversos modelos de aptitud para las 25 especies forestales principales del País Vasco con el fin de poder completar la cartografía generada en este proyecto y guiar a propietarios y gestores forestales vascos en futuras reforestaciones. Estos modelos matemáticos cuantitativos se basaron en el crecimiento anual (m) de las masas forestales vascas, según diferencia de alturas dominantes LiDAR entre 2012 y 2017. Las variables independientes de tipo físico que permitieron construir estos modelos cuantitativos y los valores con mayor puntuación para el pino silvestre fueron:

- Pendiente media (%): 28%
- Orientación: Sur.
- Precipitación media anual: 870,31 mm.
- Temperatura media anual: 10,67 °C.
- Coordinada UTM X (m): 501287.
- Coordinada UTM Y (m): 4747978

En el visor del proyecto LIFE Healthy Forest: <https://geo1.hazi.eus/healthy-forest/index.html>, puede visualizarse la clasificación de los territorios forestales del País Vasco según 3 clases de aptitud para el pino silvestre: **Alta**, **Media** y **Baja**:



El modelo conseguido también permitía localizar zonas no recomendables para el pino silvestre en el País Vasco, debido a que no se han inventariado cuadrículas con presencia de esta especie en las que se superen estos umbrales:

- No recomendable si la altitud supera 1.325 m.
- No recomendable si la precipitación anual media es inferior a 570 mm.
- No recomendable si la temperatura anual media es inferior a 8,31°C.

Principales amenazas

Los principales problemas de decaimiento en las masas de pino silvestre en el País Vasco están relacionados con la sequía estival y los daños por orugas procesionarias (*Thaumetopoea pityocampa*), aunque no se puede hablar de daños frecuentes ni generalizados, sino puntuales y localizados en las zonas límite de distribución de este pino.

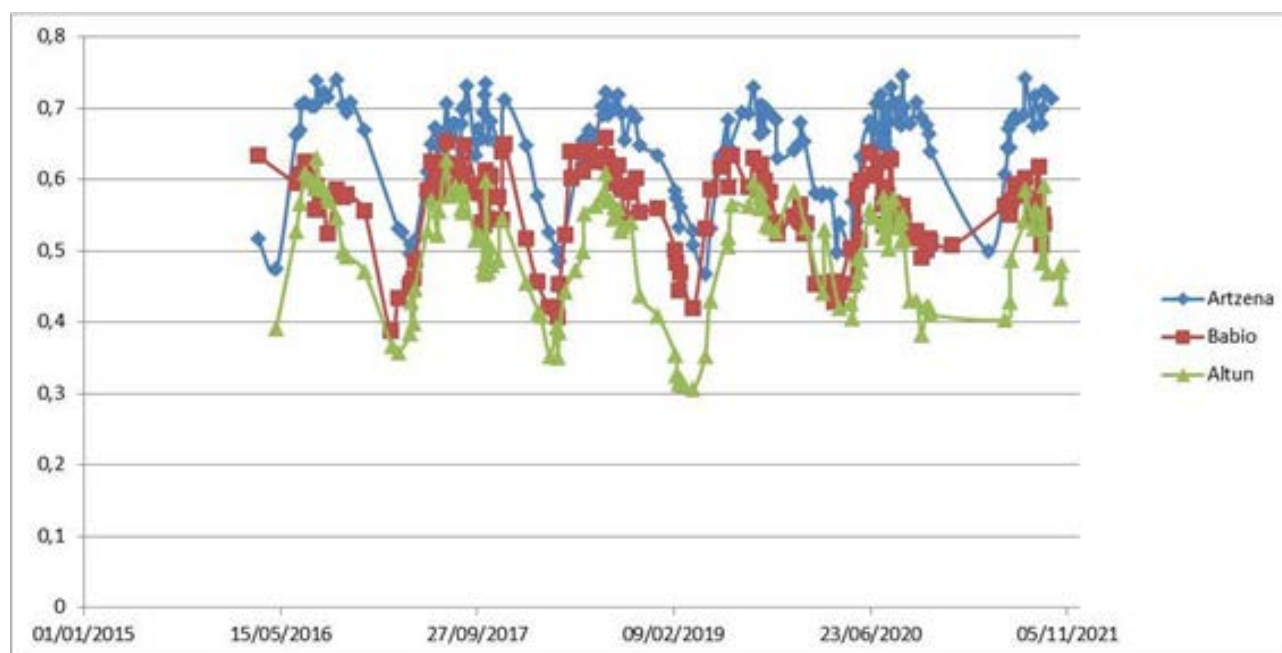
El citado proyecto LIFE Healthy Forest permitió muestrear la presencia de diversos hongos defoliadores en los pinares de silvestre del País Vasco,

aunque esa presencia no estaba relacionada con la aparición de daños. Se encontró presencia de *Dothistroma septosporum* y de *Lecanosticella acicola*, pero no de *Dothistroma pini* ni de *Fusarium circinatum*. La especie quedó clasificada como medianamente sensible a la enfermedad de las bandas. A diferencia de otras especies como *Pinus nigra* y *Pinus radiata*, no se han encontrado en el País Vasco pinares de silvestre con alto grado de defoliación causada por las bandas.

Dentro del mismo proyecto LIFE Healthy Forest se muestrearon en 2018 los ejemplares de 7 años de edad de diversas variedades europeas de *Pinus sylvestris* plantados en los arboretos vascos del proyecto Reinforce y no se encontró en las acículas recolectadas presencia de los hongos *Dothistroma septosporum* ni *Lecanostica acicola*.

Por último, el proyecto LIFE Healthy Forest permitió comprobar la **utilidad del índice NBR para el seguimiento satelital periódico de la sanidad forestal de los pinares vascos**, ya que permite cuantificar la actividad fotosintética de la vegetación. Las imágenes del satélite Sentinel-2 permiten analizar la evolución de los ciclos anuales del NBR en 3 pinares representativos de las masas de pino silvestre del País Vasco para comprobar las tendencias:

- Los valores más altos de NBR, y por tanto, mayores niveles de actividad fotosintética de los pinares, se dan en las zonas montañosas de la vertiente mediterránea, como la sierra de Artzena.
- Valores intermedios aparecen en pinares naturales situados en zonas límite, por peores suelos y clima más suave, que favorecen los ataques periódicos de procesionaria. Es el caso de los pinares del monte Babio, en Amurrio.
- Los menores valores se dan en reforestaciones de pino silvestre en la zona cantábrica, situados lejos de la distribución natural del pino silvestre: monte Altun, en Bizkaia.



Acciones / experimentaciones de gestión conocidas

Al no ser una especie de interés productivo en el País Vasco, no existen itinerarios publicados para esta especie y son escasas las iniciativas relacionadas con el pino silvestre en los montes vascos. En su momento, fue empleada como especie de montaña, resistente al frío y la nieve, y adaptada a suelos pobres y con cierta sequía estival, pero sus bajos crecimientos han ido disminuyendo el interés reforestador de esta especie.

En los últimos años, se puede citar los resultados del proyecto del Arco Atlántico Reinforce (*REsource IN-Frastructures for monitoring, adapting and protecting european atlantic FORests under Changing climatE*), en el que diversos socios de regiones atlánticas se unieron en 2011 para plantar diversos arboretos situados por toda la fachada atlántica europea, en el triángulo situado entre el norte de Escocia, Lisboa y las islas Azores.

Una de las 32 especies forestales plantadas en 2011 en estos 38 arboretos, cada una de ellas con diversas subespecies y procedencias, fue el pino silvestre. Se plantaron 5.782 plantas de pino silvestre en estos arboretos, de ellas 852 en los arboretos del País Vasco. La última medición (primavera 2021)

pone de manifiesto un mayor crecimiento del pino silvestre en el arboreto alavés, situado a mayor altura y con mayor influencia de clima mediterráneo, frente al arboreto más húmedo y templado de la costa de Gipuzkoa.

Subespecie	Origen	Arboreto AR24-Albina (cota 645)	Arboreto AR22-Irisasi (cota 240)	Media arboretos de HAZI (cm)
PISY-SLOV	Eslovenia	454	380	420
PISY-HAGE	Hagenau (Francia)	384	--	384
PISY-VALS	Valsain (España)	387	355	377
PISY-TURK	Turquía	420	317	371
Altura media (cm)	--	401	351	383

Bibliografía relevante

- Informe final de HAZI Fundazioa. Proyecto LIFE Healthy Forest.
<https://www.hazi.eus/images/documentos/forestal/hforest.pdf>.
- Resultados del proyecto del Arco Atlántico Reinforce.
<http://www.iefc.net/reinforce-presentation/>.
- CANTERO, A. (2004). Singularidad del pino silvestre en Alava. Comunicaciones / III Congreso Español de Biogeografía, 2006, ISBN 84-8373-848-1, págs. 364-371.





PINO SILVESTRE (*Pinus sylvestris*) EN NAVARRA: AUTOECOLOGÍA, AMENAZAS Y ESTRATEGIAS DE GESTIÓN



Requerimientos ecológicos del pino silvestre en Navarra

El pino silvestre presenta una gran amplitud ecológica, lo que le permite colonizar ambientes muy variados. En Navarra ocupa más de 67.000 hectáreas.

Es indiferente al sustrato, vive tanto en básicos como en muy ácidos, de profundidad y pedregosidad muy variada, y en las localidades más meridionales, es más frecuentes en umbrías porque requiere algo de humedad en el suelo.

Habita en zonas con cierta continentalidad, pues soporta bien los fríos invernales y los calores estivales, y es resistente a cierta sequía, pero no tolera la contaminación. Su carácter pionero, reflejado en su eficaz estrategia de regeneración y en su carácter

heliófilo y frugal, facilita su instalación en topografías abruptas con poco suelo, e invade fácilmente pastos poco frecuentados y cultivos abandonados.

Sus requerimientos climáticos según su distribución en Navarra se mueven en un rango entre 5° C y 12'5° C de temperatura media anual (Tm), y entre los 620 mm y 2400 mm de precipitación anual (P). La temperatura media de las mínimas (Tn) varía entre 0'5°C y 7'5°C, mientras que la media de las máximas (Tx) lo hace entre 9'5°C y 18°C. El lo en sus localizaciones navarras toma valores a partir de 4'3 y el los3, correspondiente al trimestre estival, a partir de 1'8, con un índice de continentalidad entre 12 y 18.

Itinerarios selvícolas

Los itinerarios selvícolas para el pino silvestre en Navarra están recogidos en los Planes comarcales, en concreto en el Plan Comarcal de la Comarca Pirenaica.

http://www.navarra.es/home_es/Temas/Medio+Ambiente/Montes/Planificacion+forestal.thm#header3

Estos planes se están revisando dentro del proyecto LIFE16 IPC/ES/000001 - LIFE-IP NAdapta-CC para incorporar medidas de gestión adaptativa.

<https://lifenadapta.navarra.es/es/accion-c3.4>

Amenazas

En las últimas décadas se ha observado un mayor decaimiento de los pinares, un decrecimiento en repoblaciones y un aumento de la defoliación en el

pino silvestre, principalmente en las zonas límite de su área de distribución. Entre los principales problemas se encuentran:

- **Elevada densidad:** competencia por los recursos hídricos.
- **Ausencia de gestión.** Muchas masas no han tenido tratamientos culturales intermedios.
- **La subida de las temperaturas** con un menor riesgo de heladas, amplía el área de distribución de las plagas, como la procesionaria del pino (*Thaumetopoea pityocampa*) que causa defoliación y disminución del crecimiento.
- **Parásitos como muérdago** (*Viscum album*) y hongos patógenos como *Onnia tomentosa*.
- Extensión de **otras plagas y enfermedades**.
- Riesgo de aumento en la frecuencia e intensidad de los **incendios**.
- **Dificultades en la regeneración** natural causadas por un riesgo en el incremento de episodios de sequía.

Estas amenazas están siendo evaluadas dentro del proyecto LIFE IP NADAPTA-CC. En concreto:

- Se identifica y cartografía la vulnerabilidad de los sistemas forestales. <https://lifenadapta.navarra.es/es/accion-c3.1>.
- Se están evaluando las principales amenazas, riesgos e impactos potenciales debidos al Cambio Climático para diferentes especies. Los datos y documentos oficiales, una vez publicados, se ofrecen en el siguiente repositorio documental: <https://tinyurl.com/y2hlsv3o>.

Acciones/experiencias como gestión futuras

- Dentro de LIFE16 IPC/ES/000001 - LIFE-IP NAdapta-CC se están revisando los Planes comarcales de Navarra para incorporar medidas de gestión adaptativa. <https://lifenadapta.navarra.es/accion-C3.4>.
- Dentro de LIFE16 IPC/ES/000001 - LIFE-IP NAdapta-CC se están redactando guías de gestión adaptativa para diferentes especies forestales de Navarra, entre ellas el pino silvestre (próxima publicación) <https://lifenadapta.navarra.es/es/accion-c3.3>.

Bibliografía

Gobierno de Navarra (1998): Plan Forestal de Navarra. Gobierno de Navarra

Gobierno de Navarra (2004). Mapa de Cultivos y Aprovechamientos.

Gobierno de Navarra (2011). Planes de Ordenación Territorial de Navarra

Gobierno de Navarra (2012). Mapa de Cultivos y Aprovechamientos.

Gobierno de Navarra (2012). Zonificación de Navarra.

Gobierno de Navarra (2015). Plan General Forestal de la Comarca Cantábrica.

Gobierno de Navarra (2015). Plan General Forestal de la Comarca Pirenaica

Gobierno de Navarra (2015). Plan General Forestal de la Comarca Zona Media y Ribera.

Web Gobierno de Navarra: http://www.navarra.es/home_es/Temas/Medio+Ambiente/Montes/.

"Cartografía forestal: IDENA: <https://idena.navarra.es/portal/descargar>."



EL PINO SILVESTRE EN CATALUÑA: AUTOECOLOGÍA, AMENAZAS Y ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN APLICADAS



Introducción y características ecológicas

El pino silvestre es la segunda especie forestal que ocupa un mayor número de hectáreas en Cataluña. Actualmente es la especie dominante en alrededor 250.000 ha (un 16% de la superficie forestal), de las cuales aproximadamente dos tercios son masas puras. Además, es la especie que presenta un mayor volumen de madera en pie (estimado en casi 35.000.000 m³), siendo la que más contribuye al mercado maderero catalán.

En Cataluña, la mayor parte de bosques de pino silvestre se localizan en los Pirineos, Prepirineos y en las cotas más altas de las sierras prelitorales (Figura 1). La especie es capaz de establecerse y desarrollarse sobre distintos sustratos (ácidos y básicos) y en un amplio gradiente altitudinal encontrándose, en condiciones óptimas, en altitudes comprendidas entre los 900 y 1.600 m y en orientaciones de media o marcada umbría (Lloret *et al.* 2010). En general, se distribuye en zonas de pendiente moderada (entre 10° y 30°) y requiere suelos relativamente profundos (>50 cm) y poco pedregosos (Piqué *et al.* 2011).

Aunque el pino silvestre es resistente a los vendavales, nevadas y heladas, requiere niveles de precipitación de al menos 600 mm y presenta una marcada

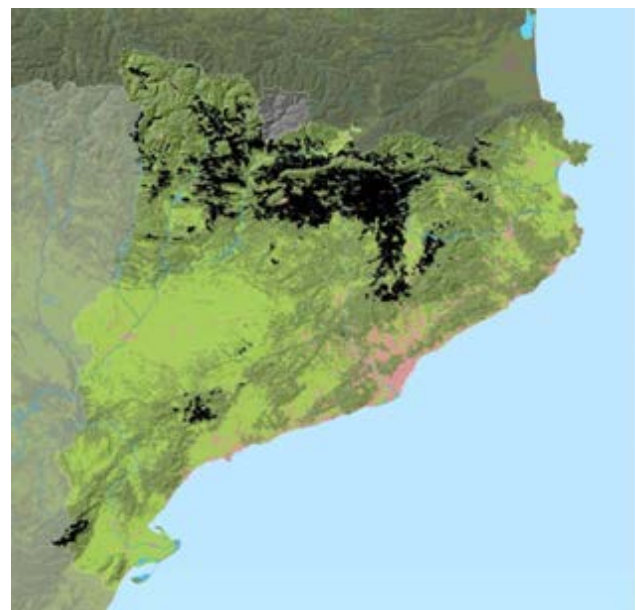


Figura 1. Izquierda: localización de las masas dominadas por pino silvestre en Cataluña (en negro). Fuente: Vericat *et al.* (2010).

amplitud térmica (de 24°C s 30°C). En general, sus mejores poblaciones se encuentran en áreas que reciben pluviometrías medianas anuales superiores a los 800 mm.

Principales amenazas

Abióticas

En Cataluña, el pino silvestre se encuentra en el límite de su distribución meridional. Por ello, es una especie particularmente vulnerable a los efectos del calentamiento global. En este sentido, modelos basados en variables topoclimáticas desarrollados por Ninyerola *et al.* (2010) predicen, para las próximas décadas, una reducción notable en la disponibilidad de hábitat idóneo del pino silvestre en Cataluña. En concreto, muestran como la superficie “idónea” para el desarrollo de la especie disminuirá de las aproximadamente 1.350.00 ha actuales (42% de la superficie de Cataluña) a valores de 460.00 ha (14%) para el período 2050-2080, bajo un escenario climático A2 (Figura 2).

Por otra parte, existen numerosos trabajos mostrando un incremento en los niveles de defoliación de las masas de pino silvestre en los últimos años asociada a la ocurrencia de sequías extremas (Vilà-Cabrera *et al.* 2012). La frecuencia de estos eventos se prevé que aumente en el futuro próximo, lo que derivaría en un incremento de los niveles de decaimiento actuales que podría comprometer la futura persistencia de muchas de estas masas (Galiano *et al.* 2010). De hecho, el proyecto DEBOSCAT, una iniciativa de seguimiento del estado de los bosques de Cataluña impulsada hace una década por el Departamento de Acción Climática, Alimentación y Agenda Rural del gobierno catalán y coordinada por el CREAL, ya ha identificado en los últimos años un número importante de episodios de decaimiento en masas dominadas por pino silvestre (Figura 3).

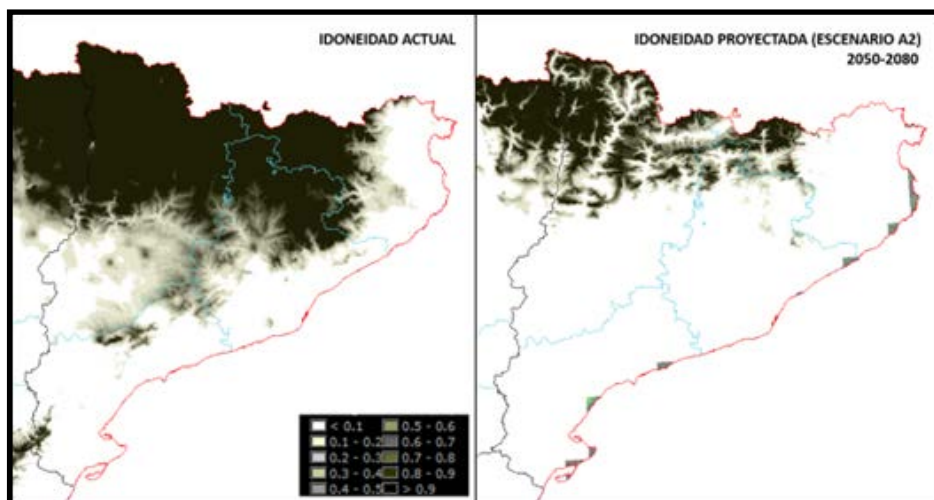


Figura 2. Mapa de idoneidad (escala de 0 a 1) para los bosques de pino silvestre de Cataluña. Fuente: Ninyerola *et al.* (2010).

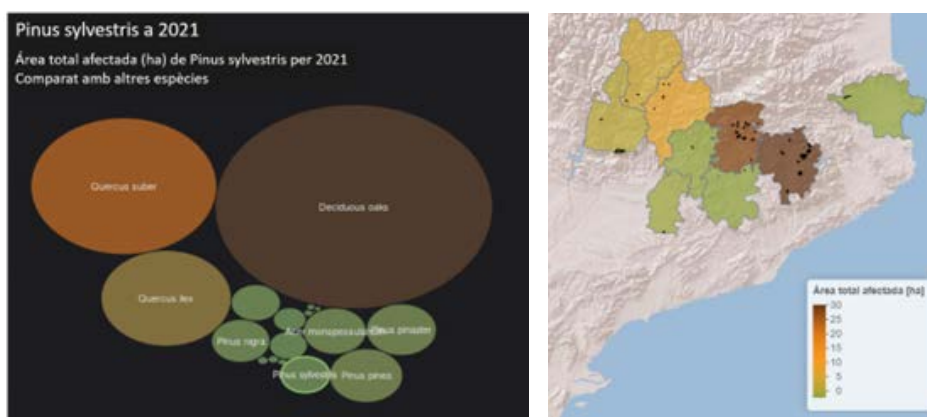


Figura 3. Superficie de bosques de pino silvestre mostrando signos de decaimiento recogidos en el marco del proyecto DEBOSCAT durante el 2021. Fuente: Laboratori Forestal Català (DEBOSCAT app: https://laboratoriforestal.creaf.cat/deboscat_app/).

A una escala inferior, otros factores modulan de manera determinante la respuesta de las masas a la sequía como la estructura, la plasticidad y variabilidad fenotípica de las poblaciones, o aspectos edáficos o de tipo microtopográfico (asociados a la disponibilidad edáfica). Todo ello complica, a nivel local, la caracterización de la vulnerabilidad de las masas frente al cambio climático (Martínez-Vilalta *et al.* 2012). Actualmente, se están desarrollando en Cataluña modelos de dinámica forestal de base ecofisiológica, como el modelo MEDFATE (De Cáceres *et al.* 2015), que deberían conllevar avances sustanciales en este ámbito y mejorar la comprensión (y predicción) de los efectos de estos procesos en la dinámica de los bosques de pino silvestre.

Bióticas

Durante los últimos años, se ha observado un incremento en la afectación de las poblaciones de pino silvestre de Cataluña por insectos defoliadores como la procesionaria del pino (*Thaumetopoea pityocampa*). Si bien es cierto que los inviernos suaves, cada vez más frecuentes en el contexto de calentamiento global actual, promueven la supervivencia de las larvas y favorecen la expansión de la especie a nivel altitudinal y latitudinal (Hódar y Zamora 2004), también lo es el carácter cíclico que presentan estas perturbaciones. Estos ciclos vienen determinados, entre otros factores, por una regulación de tipo biótico asociada a depredadores naturales como aves o parasitoides (Hódar *et al.* 2012).

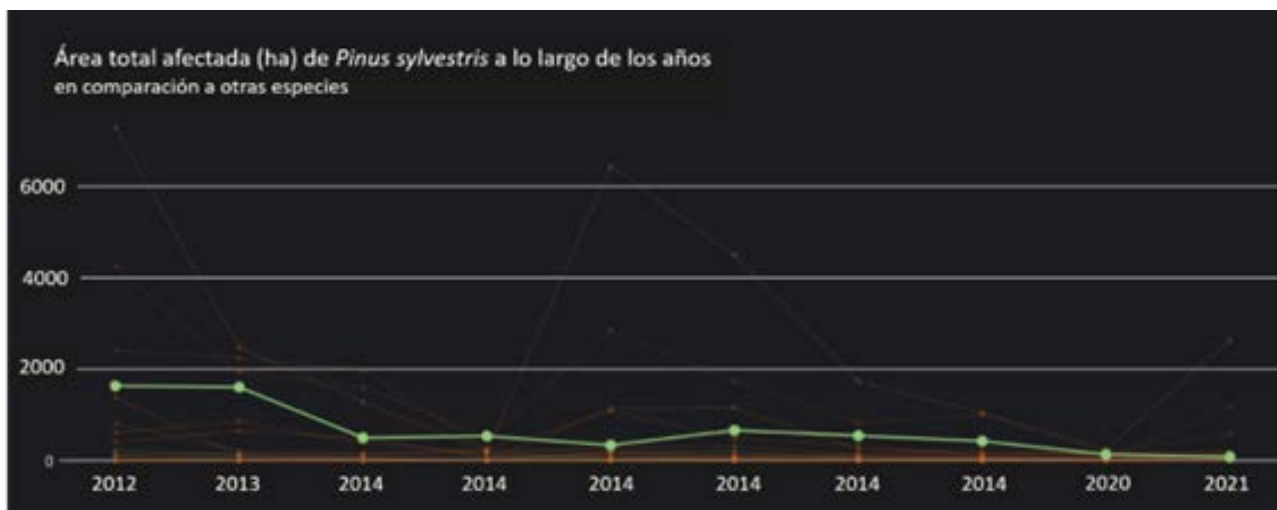


Figura 4. Evolución del área (ha) de pino silvestre en las que se han identificado signos de decaimiento durante el último decenio (línea verde) en el marco del proyecto DEBOSCAT. Fuente: Laboratori Forestal Català. (DEBOSCAT app: https://laboratoriforestal.creaf.cat/deboscat_app/).

Además de generar un aumento en la intensidad y frecuencia de sequías, se prevé que el cambio climático modifique el régimen de incendios e incremente la exposición de las masas de pino silvestre frente a ellos. Trabajos científicos en este ámbito han estimado que el porcentaje de masas vulnerables a estos eventos (obtenido en base a modelos elaborados con variables topoclimáticas) pasará del 32% al 66%, a nivel de la Península Ibérica (Vilà-Cabrera *et al.* 2011). Ello podría comprometer la persistencia de las masas localizadas en ámbitos más secos (más expuestas a los incendios) y facilitar la expansión, en estos ámbitos, de poblaciones de quercíneas rebrotadoras o de formaciones de matorral (Figura 3).

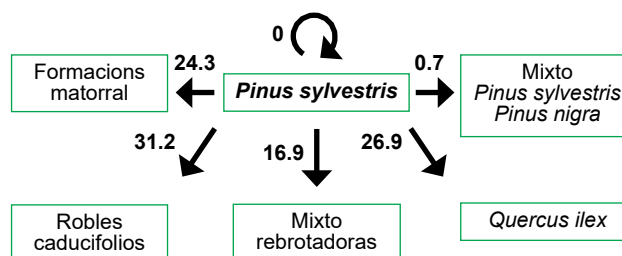


Figura 5. Resultados de las predicciones del modelo desarrollado en Vilà-Cabrera *et al.* (2011) sobre el porcentaje del área quemada de pino silvestre que evolucionará hacia otro tipo de formaciones, 30 años después del incendio.

La afectación de los bosques de pino silvestre por otras plagas, como los escarabajos perforadores de los géneros *Tomiscus* e *Ips*, también se ha visto incre-

mentada por las oleadas de calor y sequía (Jaime *et al.* 2022), dado que el calor promueve la reproducción de los insectos (que pueden completar más de un ciclo vital por año). Los rodales afectados por estos escoltídos resultan, a su vez, más vulnerables

frente a futuras sequías. Este tipo de interacciones también se dan entre la sequía y la presencia de muérdago (Figura 6), relativamente abundante en algunos rodales de pino silvestre del Pirineo situados al límite de su distribución altitudinal (Galiano 2010).

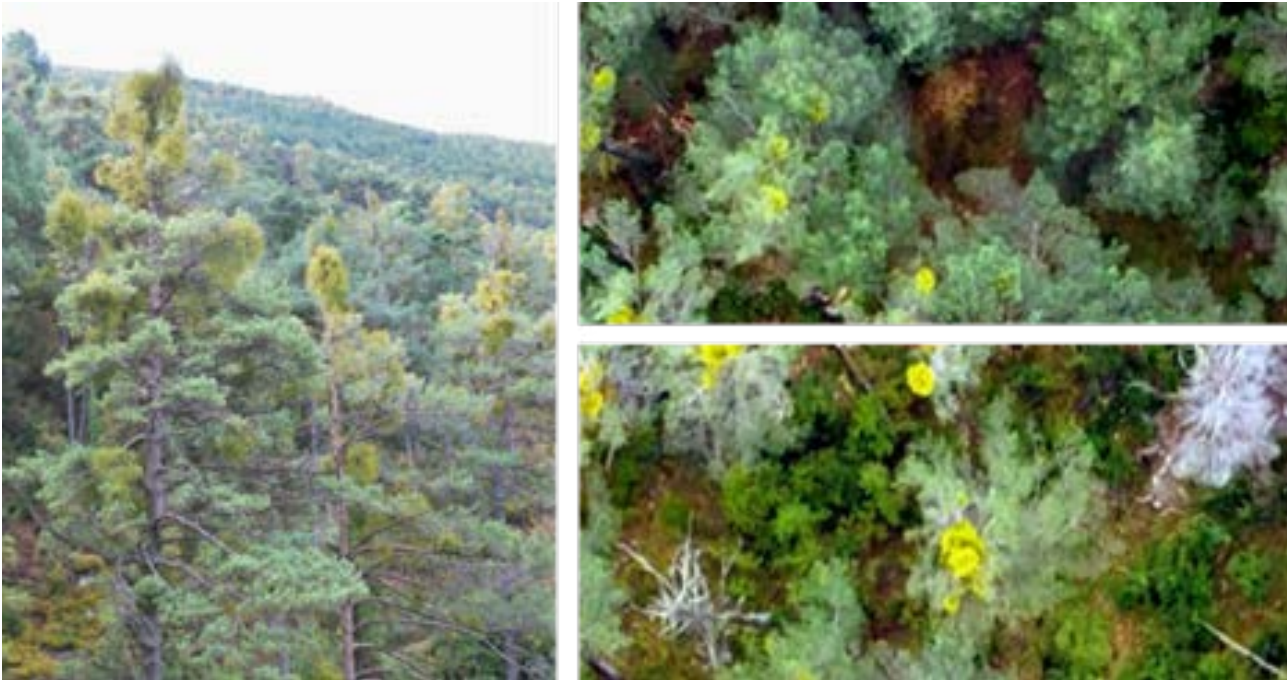


Figura 6. Vista frontal y aérea de bosques de pino silvestre afectados por sequía y muérdago en el Pirineo catalán (Arcalís, Pallars Sobirà).

Retos para la gestión del pino silvestre en Cataluña: la regeneración

Uno de los principales retos silvícolas que se presentan los próximos años en Cataluña es la regeneración de las masas de pino silvestre. La mayoría de estas masas ocupan el piso montano y son formaciones secundarias que representan una etapa dinámica hacia otras formaciones. Actualmente muchos pinares de silvestre del Prepirineo catalán se caracterizan por presentar:

- **Estructuras regularizadas**, ya que proceden de procesos de colonización natural o, en menor medida, de repoblación, que comienzan a entrar en la edad de regeneración (> 60 años).

- **Ausencia de reclutamiento de nuevos individuos**, ni en las gestionadas por cortes de selección diametral (mayoritarias), ni en las excesivamente densas debido al abandono de la gestión.
- **Un subvuelo de frondosas** (roble, haya...) que amenaza con sustituirlas.

Además, el pino silvestre en la península ibérica se encuentra en el límite meridional de su distribución europea, lo que aumenta su vulnerabilidad frente a las nuevas condiciones climáticas (Figura 1).

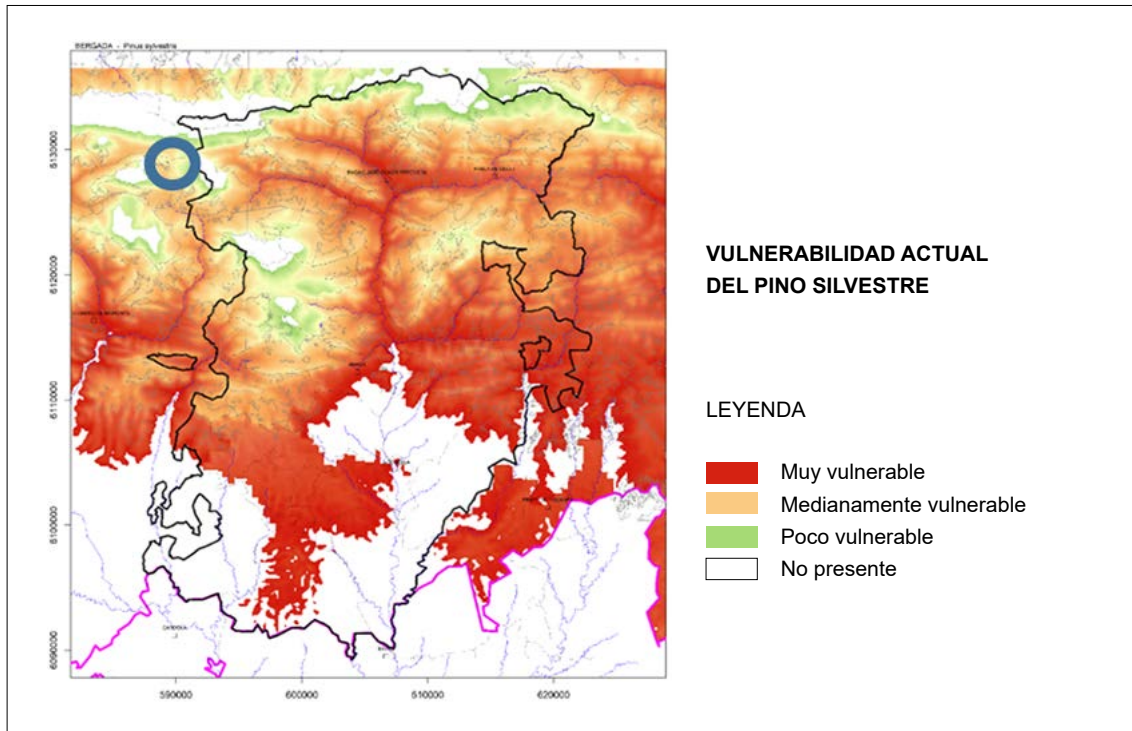


Figura 1. Sección correspondiente a la comarca del Berguedà del Mapa de Vulnerabilidad Actual (VCA) para el pino silvestre en el macizo pirenaico, elaborado en el proyecto CANOPEE (2018), a partir de la serie climática 1980-2010 armonizada para todo el Pirineo con resolución inferior a 1 km. El círculo azul indica la ubicación de parcelas demostrativas de la XPD del CPF.

Gestión actual y experimentaciones

Tratamientos silvícolas de puesta en luz para estimular la regeneración

En gran parte del Prepirineo catalán el pino silvestre se ha gestionado como **bosque alto irregular para cortas de selección o diametrales**. El origen más o menos coetáneo de las masas por colonización de antiguos pastos y el carácter heliófilo de la especie han hecho difícil el reclutamiento de nuevos individuos en respuesta a estos tratamientos, si no es formando grupos de regenerado después de perturbaciones (naturales o asociadas a la propia gestión). Ante esta situación se presentan dos opciones selvícolas:

- **Si el pinar presenta una estructura desequilibrada** en relación a la distribución ideal de edades, avanzar hacia una irregularización real de la masa por bosquets, creando oberturas de luz para la instalación de bosquetes de nuevo regenerado.
- **Si la estructura del pinar es claramente regular**, avanzar en la gestión de bosque regular hasta que las características del rodal permitan iniciar los tratamientos de regeneración.

En cualquier caso, para estimular la regeneración del pino silvestre hay que crear una obertura del dosel arbóreo que introduzca grados de heterogeneidad sobre las condiciones ecológicas existentes en el seno del rodal, pero sin que la magnitud de la perturbación suponga la pérdida de la influencia de l arbolado de alrededor. Esto se puede conseguir con aperturas intensas progresivas (aclareo sucesivo uniforme, en el caso de rodales regulares) o con la generación de claros desarbolados (bosquetes de regeneración, en estructuras irregulares).

En relación a estos últimos, las **Orientaciones de Gestión Forestal Sostenible de Cataluña (OR-GEST) para el pino silvestre** (Piqué *et al.*, 2011), consideran dos opciones en función del tamaño de la obertura:

- **Bosquetes pequeños**, desde 500 a 1.000 m² de superficie hasta 3.000 m²; por corta a hecho.
- **Bosquetes medianos**, de 3.000 m² hasta 1 ha, por aclareo sucesivo uniforme.

A nivel operativo, esto se ha traducido habitualmente en la recomendación de generar oberturas por cortas a hecho sólo cuando la dimensión del claro sea inferior al doble de la altura de los árboles. Una vez hecha la corta, la duración del período de regeneración se considera de 20 años, la cual se da por alcanzada cuando el número de pies de regenerado que supera los 1,30 m de altura es superior a los 3.000 pies/ha.

Seguimiento de parcelas: la Red de Parcelas Demostrativas del CPF

Ante la constatación de la dificultad de alcanzar nuevo regenerado de pino silvestre en varios rodales donde se han iniciado estas cortas, cabe preguntarse: ¿siguen siendo válidas estas premisas bajo las nuevas condiciones climáticas, o hay que introducir nuevas consideraciones para lograrlas la regeneración en Cataluña?.

En 2007, el CPF inició el seguimiento de una Red de Parcelas Demostrativas en pino silvestre y pino laricio para evaluar tanto la viabilidad de diferentes métodos de regeneración como las variables más influyentes en el éxito de ésta. La red incluye 10 fincas en diferentes localizaciones y condiciones edafoclimáticas donde se estudia el éxito del regenerado bajo tratamientos de aclareo sucesivo uniforme, cor-

ta por bosquetes y fajas. En 4 de estas fincas, juntamente con el CTFC y la UdL, se está estudiando el efecto de diferentes procedencias de pino laricio y pino silvestre en condiciones ambientales contrastadas y el efecto del matorral en la supervivencia de los plantones, en rodales donde se han abierto bosquetes de regeneración. Los resultados preliminares de estas experiencias se recogen en Baiges *et al.* (2019) y apuntan a lo siguiente:

- En condiciones de mediterraneidad y proyecciones de períodos de sequía más prolongados, será necesario **valorar adecuadamente el grado de alteración del microclima** que asume con la corta, especialmente en rodales de relieve heterogéneo, donde habrá que **tener en cuenta más que nunca, las microestaciones**.
- En algunos pinares del Prepirineo se observan unas **tasas de germinación bajas** que, sin embargo, mejoran ligeramente si se realiza un **decapado del suelo**.
- En los estudios realizados no se ha observado, de momento, un efecto facilitador ni competidor de la vegetación herbácea o arbustiva en el desarrollo de los vástagos, pero está claro que habrá que considerar una **adecuada gestión del matorral en los tratamientos de regeneración**.
- Se detectan indicios de un potencial **efecto de plagas y hongos patógenos** en la viabilidad de las semillas, su germinación y el desarrollo del regenerado de los pinos, que hay que seguir estudiando.



Transecto para el seguimiento del regenerado tras una corta de regeneración por bosquetes.



Bibliografía

- De Cáceres M., Martínez-Vilalta J., Coll L., Llorens P., Casals P., Poyatos R., Pausas J.G., Brotons L. 2015. *Coupling a water balance model with forest inventory data to predict drought stress: the role of forest structural changes vs. climate changes*. Agricultural and Forest Meteorology 213: 77-90.
- Galiano L., Martínez-Vilalta J., Lloret F. 2010. *Drought-induced multifactor decline of Scots pine in the Pyrenees and potential vegetation change by the expansion of co-occurring oak species*. Ecosystems 13: 978-991.
- Hódar J.A., Zamora R. 2004. *Herbivory and climatic warming: a Mediterranean outbreaking caterpillar attacks a relict, boreal pine species*. Biodiversity and Conservation 13: 493-500.
- Hódar J.A., Zamora R., Cayuela L. 2012. *Cambio climático y plagas: algo más que el clima*. Ecosistemas 21(3):73-78.
- Jaime L., Batllori E., Ferretti M., Lloret F. 2022. *Climatic and stand drivers of forest resistance to recent bark beetle disturbance in European coniferous forests*. Global Change Biology 28: 2830-2841.
- Lloret F., Estevan H., Solé A., Vayreda J., Terradas J. 2010. *Atlas d'espècies lleyoses dels boscos de Catalunya*. <http://oslo.geodata.es/ftp/lleyenoses/>.
- Martínez-Vilalta J., Aguade D., Banque M., Barba J., Yuste J.C., Galiano L., García N., Gómez M., Heres A., López B.C., Lloret F., Poyatos R., Retana J., Sus O., Vayreda J., Vilà-Cabrera A. 2012. *Las poblaciones ibéricas de pino albar ante el cambio climático: con la muerte en los talones*. Ecosistemas 21: 15-21.
- Ninyerola M., Serra-Díaz J.M., Lloret F. 2010. *Atlas de idoneidad topo-climática de leñosas*. Servidor de mapas. Universitat Autònoma de Barcelona. URL: <http://www.opengis.uab.cat/ldoneitatPI/index.html>.
- Piqué M., Vericat P., Cervera T., Farriol R., Baiges T. 2011. *Models de gestió per als boscos de pi roig (Pinus sylvestris L.): producció de fusta i prevenció d'incendis forestals*. Sèrie: Orientacions de Gestió Forestal Sostenible per a Catalunya (ORGEST). Centre de la Propietat Forestal. Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural. Generalitat de Catalunya.
- Vericat P., Piqué M., Koua O., Pla M., 2010. *Mapa de formacions forestals pures i mixtes de Catalunya a partir del Mapa Forestal de España 1:50.000 digitalitzat*. Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya.
- Vilà-Cabrera A., Martínez-Vilalta J., Vayreda J., Retana J. 2011. *Structural and climatic determinants of demographic rates of Scots pine forests across the Iberian Peninsula*. Ecological Applications 21: 1162-1172.
- Vilà-Cabrera A., Rodrigo A., Martínez-Vilalta J., Retana J. 2012. *Lack of regeneration and climatic vulnerability to fire of Scots pine may induce vegetation shifts at the southern edge of its distribution*. Journal of Biogeography 39: 488-496.



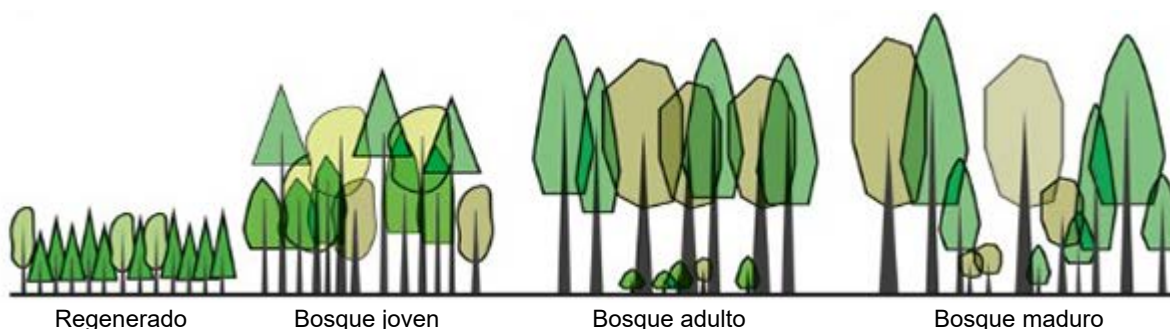
ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO APLICADAS A LOS BOSQUES PIRENAICOS



En el marco de los proyectos CANOPEE y ACCLIMAFOR, se han aplicado y analizado diferentes tratamientos para la adaptación de los bosques pirenaicos al cambio climático. Las técnicas silvícolas implementadas se apoyan mayoritariamente en técnicas ya usadas habitualmente por los gestores forestales, en las que se han introducido modificaciones de acuerdo con el nuevo contexto climático. Se agrupan en cinco estrategias principales:

1. Claras y clareos
2. Adaptación del diámetro de corta.
3. Diversificación.
4. Reducción del riesgo de incendio.
5. Elección de especies y procedencias en plantaciones.

Oportunidades de intervención en gestión adaptativa según fase de desarrollo



Elección de especies y procedencias en plantaciones, incluyendo migración asistida.

Diversificación (mantenimiento masas mixtas en regenerados y plantaciones).

Clareos y resalveos.

Aplicación y adaptación de las claras, modificando intensidad, régimen y criterios.

Diversificación (promoción de especies esporádicas, mantenimiento masas mixtas).

Adaptación del diámetro de corta (reducir diámetros de corta o alargar turnos) **y de las cortas de regeneración.**

Diversificación (promoción de especies esporádicas, mantenimiento masas mixtas, retención elementos biodiversidad).

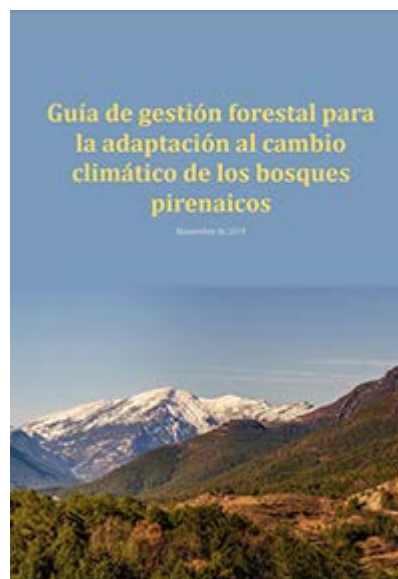
En el marco del proyecto ACCLIMAFOR se han elaborado dos fichas resumen, con ejemplos de la red de parcelas experimentales y demostrativas creada en el ámbito del macizo pinaico:

- *Tratamientos de adaptación al cambio climático en bosques ya establecidos.*
- *Plantaciones: elección de especies y procedencias.*

Para más información:

CANOPEE (2019). *Guía de gestión forestal para la adaptación al cambio climático de los bosques pirenaicos*. 128 pp.

Geoportal del OPCC, con información de la red de parcelas: <https://www.opcc-ctp.org/es/geoportal>.



Claros, clareos y resalveos

Los clareos, las claras y resalveos son cortas parciales que se practican en un rodal con el objetivo de mejorar la estabilidad y calidad de la masa, eliminando los pies peor conformados, controlando la composición específica y favoreciendo el crecimiento de los pies remanentes. En el contexto de la gestión adaptativa, estas actuaciones buscarán reforzar uno o más de los siguientes objetivos:

- **Aumento de la vitalidad y la resistencia individual a agentes bióticos y abióticos:** cada árbol conservado puede desarrollarse más libremente y con un nivel de estrés muy inferior al de una situación competitiva, encontrándose en mejores condiciones fisiológicas y por tanto más apto para reaccionar ante el estrés

- **Aumento de la diversidad interespecífica e intraespecífica** para desarrollar la resistencia, la resiliencia y la capacidad de adaptación de los rodales,
- **Incremento de la diversidad estructural**, porque según las edades y dimensiones individuales, la sensibilidad al estrés biótico y abiótico es diferente.
- **Aceleración de cambios en la estructura o composición de especies**, particularmente adecuado en el caso de especies objetivo en el límite inferior del área de distribución.

Estos objetivos se consiguen mediante la **modulación de la frecuencia, tiempo, intensidad y criterios de selección de las cortas**.

Adaptación del diámetro de corta

El diámetro es el parámetro más utilizado para determinar la madurez de un rodal desde el punto de vista productivo y corresponde a un criterio de comercialización inevitable. La cuestión de adaptar el diámetro de aprovechamiento se plantea **cuando la especie objetivo se puede mantener, pero hay un riesgo de decaimiento evidente o probable antes de que**

se haya alcanzado dicho diámetro. La edad de los árboles es uno de los principales factores de vulnerabilidad al estrés hídrico, por lo que **reducir el diámetro de corta puede ser una solución de compromiso para atenuar el riesgo de depreciación**.

Habitualmente, la elección del diámetro de corta es el resultado de un análisis técnico-económico que tiene en cuenta el crecimiento en de la masa según la fertilidad, el precio de venta, los gastos realizados a lo largo de la rotación y las condiciones de explotación. **En el nuevo contexto climático, cabría añadir el factor de riesgo asociado a decaimientos (sequía, canícula) y perturbaciones.** Lógicamente, el beneficio esperado disminuye cuando se introduce la noción de riesgo, sobre todo si no hay posibilidad de recuperación de ingresos, debido a la depreciación de la madera afectada. Así, los criterios que inciden en la elección de los diámetros de corta se verían modificados por:

- La **probabilidad de que ocurra una perturbación sequía/canícula** provocando decaimientos y mortalidades.
- La **posibilidad de comercialización de la madera afectada.** A priori, cuanto más severo es el

episodio climático (pérdida rápida de la calidad de la madera) y extenso geográficamente (mercado de la madera saturado) más baja será la posibilidad de obtener ingresos de la venta de la madera afectada.

A nivel una gestión adaptativa, esto podría llevar a cuestionar la especie-objetivo y la existencia de una limitación técnica o económica para sustituirla.

La introducción de este nuevo criterio en zonas de alto riesgo, **de ninguna manera resta valor a la importancia de mantener y/o promover varios árboles grandes/viejos con dendromicrohábitats, importantes para la biodiversidad.** De hecho, en determinadas situaciones, podría considerarse el **alargamiento de turnos**, para aumentar la madurez del rodal y mejorar las funciones ecológicas del mismo como una estrategia de resiliencia alternativa.

Diversificación

Los tratamientos de diversificación se dirigen a **aumentar la complejidad del bosque**, entendida como diversidad, a pequeña escala, de composición (masas mixtas), y de estructuras en dimensión vertical (estratos) y horizontal (mosaicos). **Un sistema forestal complejo y biodiverso se considera más resiliente y resistente a las perturbaciones derivadas del cambio climático** dado que promueve la emergencia de respuestas adaptativas capaces de hacer frente a la incertidumbre asociada al cambio climático. Existen tres escalas de diversificación:

- **Diversificación genética:** dentro de una misma especie, se busca maximizar la diversidad de procedencias locales, productivas y adaptables, ya sean de especies autóctonas o aclimatadas. El objetivo es fomentar de la adaptación genética in situ y también mediante migración.
- **Diversificación de especies:** dentro de una comunidad, se favorecen las mezclas de las especies arbóreas dominantes y se mantienen, o incluso se introducen en plantaciones o regeneraciones naturales, las especies del sotobosque. El objetivo es conseguir un aumento de la complejidad del rodal en general y de la diversidad estructural vertical (estratos).

- **Diversificación estructural:** dentro de una comunidad, se aumenta el número de estratos del rodal (estructural vertical) o, a nivel del paisaje, se promueve la aparición de distintas comunidades o mosaicos (estructura horizontal).

Muchos de los **tratamientos de diversificación** tienen efecto a la vez sobre la diversidad de composición y la estructural, y suelen aplicarse combinados entre ellos. Algunos ejemplos son:

- **Promoción de la diversidad en bosques ya mixtos:**
 - **Selvicultura de árbol individual** (para la promoción de especies esporádicas e individuos de alto valor económico o ecológico (*tree-oriented silviculture*)).
 - **Gestión de bosques mixtos biestratificados como "monte medio irregular" (MMI) (o *coppice with standards*).** Comprende la gestión en dos estratos: uno inferior de rebrote para producción de leñas y uno superior, irregular, de pies de semilla de especies de valor para producción de madera.
 - **Retención de elementos clave (o "*retention forestry*").** Mantener intencionadamente, en el

momento de la corta, estructuras e individuos importantes para la biodiversidad que se quedarán en el rodal a largo plazo (legados como árboles viejos grandes, vivos y muertos, que requieren un tiempo de desarrollo más allá del turno de corta).

- **Incorporación de nuevas especies en masas poco diversas:**

- **Apoyo a la regeneración natural:** Obertura de huecos de diferentes tamaños para modular la entrada de luz (directa o lateral), adecuados a la ecología de las especies y aprovechando el regenerado a la espera. Esta práctica genera también diversidad de estructuras horizontal (pequeños mosaicos). Puede plantearse la instalación de protectores o valorar mantener el matorral como elemento protector y facilitador, más que competidor.
- **Plantaciones (o siembras) de enriquecimiento, en zonas muy simplificadas** en composición específica o como fase previa a la obertura de huecos en especies tolerantes a la sombra.

- **Prácticas que favorecen la diversidad y adaptación genética del arbolado** para asegurar una diversidad genética suficiente como para permitir la posibilidad de una selección natural posterior, adaptada a las nuevas condiciones climáticas:

- **Adaptar la densidad y los criterios de selección de árboles en las cortas de regeneración:** Aumentar el número de árboles semilleros en las cortas diseminatorias y mantener una alta diversidad fenotípica.
- **La migración asistida.** Uso de material forestal de otras procedencias más acordes con la nueva situación climática actual o proyectada

Más allá de la **gestión a escala de monte o rodal**, debe tenerse en cuenta también su relación con la **escala de paisaje**, especialmente a la hora de priorizar actuaciones, por ejemplo, en los rodales menos diversos funcionalmente o favorecer aquellas especies que aporten nuevos rasgos funcionales inexistentes en el global del paisaje.

Reducción del riesgo de incendio

Las zonas de montaña como los Pirineos, debido a una orografía accidentada, con laderas de fuerte pendiente, han sido históricamente zonas expuestas a fenómenos naturales adversos como aludes de nieve, avenidas torrenciales e inundaciones de ríos. La necesidad de convivir con esa amenaza obliga a intentar minimizar el riesgo y los impactos de estos fenómenos sobre las actividades y las poblaciones humanas. Por este motivo, o la presencia de un medio natural de protección es capital y, en este contexto, **los bosques de la alta montaña son muy importantes, al ser considerados bosques protectores o de defensa frente a fenómenos adversos**. Comparado a los dispositivos y construcciones de protección contra las avalanchas, los bosques protectores tienen un coste económico muy bajo y a la vez son más ecológicos.

Aunque los Pirineos están menos afectados por los incendios que la zona mediterránea hasta la fecha, son más vulnerables, sobre todo por su composición

específica y el riesgo de degradación de la fertilidad del suelo. el aumento de las temperaturas y de los periodos secos es previsible. Además, **“Las zonas de montaña, como los Pirineos, serán más vulnerables y estarán expuestas a un régimen de incendios mayor que el actual. La inflamabilidad de la vegetación y el periodo de susceptibilidad al fuego aumentarán y, como consecuencia, cabe esperar incendios más frecuentes, extensos e intensos”.** (COLL, et al., 2019). Por lo tanto, **su capacidad de recuperación será menor**, lo que puede plantear problemas importantes, especialmente para los bosques de protección de riesgos.

Las acciones de mitigación de incendios forestales consisten en **reducir la cantidad de combustible y su continuidad horizontal y vertical**, ya que tienen un impacto significativo en el comportamiento del fuego (intensidad y velocidad de propagación), principalmente a través del desbroce del sotobosque, claras, clareos, y la poda de árboles.

Red de parcelas experimentales y demostrativas en el Pirineo, creada en el marco de los proyectos CANOPEE y ACCLIMAFOR - Parcelas de gestión forestal en bosques ya existentes

RODALES CANOPEE (2018)

Objetivos	<ul style="list-style-type: none"> Regulación de la competencia para aumentar la vitalidad y la eficiencia en el uso del agua Mantener la mezcla de especies o favorecer la especie más adaptada a la sequía
------------------	--

Región	Formación forestal	Tratamiento	Socio
Occitania	Hayedo de montaña adulto	Clara selectiva mixta	ONF
Occitania	Abetal de montaña con haya	Clara selectiva mixta	ONF
Occitania	Monte bajo de castaño con acacia	Clara selectiva mixta favoreciendo la acacia	CNPF
Nueva Aquitania	Monte bajo de castaño con reserva de roble pedunculado coetáneo	Conversión a monte alto de un rodal biestratificado: entresaca en monte algo y corta intensa del monte bajo	CNPF
Cataluña	Regenerado post-incendio de roblepubescente con pies dispersos de pino negral	Resalveo dirigido alrededor de los brinzales de pino	CTFC
Cataluña	Encinar de montaña. Monte bajo.	Resalveo/Clara baja para mejorar vitalidad y mejora del agua azul en la cuenca	CPF
Navarra	Pino negral (var. Austriaca)	Clara de intensidad alta (30% ab) y baja (15% ab)	GAN-NIK
Aragón	Abetal montano con pino silvestre	Clara selectiva de individuos debilitados	IPE-CSIC
País Vasco	Monte bajo de encina en latizal	Resalveo selectivo mixto	HAZI

Objetivo	Reducción del riesgo, virulencia e intensidad de incendios
-----------------	--

Región	Formación forestal	Tratamiento	Socio
Andorra	Bosque protector de pino silvestre y pino negro	Corta sanitaria, poda y desbroce	IEA-CENMA

RODALES ACCLIMAFOR (2020)

Objetivos	<ul style="list-style-type: none"> Actuar en zonas catalogadas como "vulnerables al cambio climático" o con decaimiento. En las regiones de la vertiente sur, testar diferentes actuaciones sobre pino silvestre, especie amenazada y de interés económico
------------------	--

Región	Formación forestal	Tratamiento	Socio
Occitania	Monte bajo de roble con haya	Clara selectiva mixta (10% volumen) para favorecer el roble	CNPF
Occitania	Plantación de fresno de 30 años (50 procedencias) con mucho sotobosque	Desbroce total en 1 de cada 2 calles	CNPF
Nueva Aquitania	Plantación e larix del Japón (<i>L. kaempferi</i>) de 70 años de 500 pies/ha inestable	Clara selectiva para aumentar la estabilidad y vitalidad de la massa	CNPF
Cataluña	Bosques de pino silvestre neutrobásófilos y mesófilos	Clara selectiva	CTFC
Cataluña	Bosque de pino silvestre adulto	Adaptación de las cortas de regeneración. Ensayo de 5 tratamientos (fajas, bosquetes, aclareo sucesivo de 2 intensidades, entresaca)	CPF
Navarra	Masa semirregular de pino silvestre de regeneración natural, con diferente composición y densidad	Clara por lo alto, con marcación previa pie a pie, para mejorar la vitalidad y heterogeneidad, favoreciendo la presencia de <i>Quercus humilis</i> , <i>Sorbus torminalis</i> , <i>S. aucuparia</i> y <i>Acer opalus</i> .	GAN-NIK

Para más información

Geoportal del OPCC: <https://www.opcc-ctp.org/es/geoportal>.



PLANTACIONES DEMOSTRATIVAS PARA LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO



La distribución de una especie vegetal está determinada por la existencia a lo largo del tiempo de unas condiciones mínimas ecológicas que permitan su persistencia. Cada especie arbórea ocupa un nicho ecológico específico definido especialmente por sus condiciones edáficas, térmicas e hídricas. Esto explica, entre otras cosas, el escalonamiento de las especies forestales en un entorno de montaña. Cuando no se reúnen las condiciones mínimas, **la persistencia de la especie depende de su capacidad de migrar hacia localidades favorables**. Aunque las especies sean capaces de migrar para seguir su nicho ecológico, en el actual contexto de alteración climática acelerada existe la duda en cuanto a la capacidad de los árboles –inmóviles y longevos– de dispersarse a la misma velocidad con la que el clima evoluciona, especialmente en paisajes fragmentados. Las especies vegetales también se adaptan a los cambios ecológicos modificando sus características morfológicas y fisiológicas. Esta variabilidad se conoce como plasticidad. Sin embargo, resulta muy difícil conocer si la plasticidad de las especies principales o secundarias de un rodal será suficiente para cubrir la variación del cambio climático en buenas condiciones fisiológicas.

Para hacer frente a las nuevas condiciones climáticas, es responsabilidad del gestor forestal el aplicar una silvicultura que favorezca las especies menos vulnerables a los efectos del calentamiento global. En este sentido se ha apuntado desde algunos ámbitos la pertinencia de promover antrópicamente el desplazamiento de especies con el fin de anticiparse a los efectos del cambio climático. Este tipo de acciones, recogidas bajo el concepto de migración asistida, pueden considerarse a tres niveles distintos.

- 1. Migración asistida de las poblaciones:** en el seno de una misma especie, los individuos tienen cierta plasticidad fenotípica o fisiológica que puede ser de naturaleza adaptativa. Esto explica la existencia de subespecies o de ecotipos distintos en una misma especie. En el momento de la plantación, es importante la elección correcta de la procedencia de la especie en función de las características pedoclimáticas actuales y también de las condiciones ambientales.
- 2. Expansión asistida de la especie:** desplazamiento anticipado de las especies hacia zonas limítrofes de sus áreas de distribución actuales con el objetivo de facilitar y acelerar los procesos naturales de migración.
- 3. Migración asistida a “larga distancia”:** introducción de especies en territorios que no serían accesibles para esas especies a través de procesos de dispersión natural. Se elegirán entonces especies que se suponen mejor adaptadas y resistentes a las condiciones climáticas venideras.

El método de migración asistida no está exento de «riesgo» ni es «garantía de éxito» y está sujeta a debate. En todos los casos, se debe aplicar un enfoque que limite en lo posible los principales riesgos, a saber, un carácter invasivo o un riesgo de hibridación con las poblaciones de plantas locales. Para un buen éxito de estas prácticas, es necesario tener buenos conocimientos sobre:

- La autoecología de las especies y los parámetros que influyen en su distribución,

- Las causas de mortalidad y la proporción atribuible al cambio climático,
- Las proyecciones climáticas; siendo inciertas las de fin de siglo, es más razonable confiar en previsiones a medio plazo: 2030-2060.

En el marco de nuevas plantaciones forestales, se ha apuntado desde algunos ámbitos la pertinencia de utilizar especies o procedencias características de ámbitos más xéricos: con una mayor resistencia y capacidad de adaptación a la sequía que a aquellas propias del lugar (especies o procedencias locales). El recurrir a especies no presentes de manera natural en el monte requiere de importantes estudios previos con el fin de caracterizar adecuadamente su adaptabilidad, su capacidad de producción e incluso su potencial invasor. Este riesgo de invasión biológica es particularmente difícil de predecir porque puede darse a largo plazo. Además, la introducción de especies en un nuevo ecosistema no es siempre exitosa y hay muchas plantaciones que fracasan por diversas razones: problemas de adaptación a las nuevas condiciones climáticas, competencia por los recursos con la vegetación circundante, las asociaciones tróficas simbióticas etc. Por ello, la introducción de nuevas especies en nuevos territorios requiere un buen conocimiento de la ecología de las especies y de una incertidumbre la más baja posible de las previsiones climáticas futuras. En contraposición a la introducción de nuevas especies, la elección de procedencias propias de ambientes más secos o cálidos es una opción más conservadora y sujeta, aparentemente, a menos riesgo.

A escala detallada, las características del microsítio de plantación contribuyen al éxito de la plantación. Así, una vez establecidos los plantones, y frente a la reducción prevista de la disponibilidad hídrica como

consecuencia del incremento de la demanda evaporativa, las condiciones microambientales del sitio de plantación determinarán en gran parte su supervivencia y posterior desarrollo. La gestión del estrato herbáceo (altamente competitivo por los recursos del suelo) y el control de la insolación a la que se ven expuestos los plantones puede resultar fundamental para el éxito de la plantación. Los métodos clásicos de control de la vegetación competitiva incluyen la ejecución de laboreos o gradeos, de desbroces mecánicos o químicos y el empleo de acolchados (sintéticos o naturales) (Navarro-Cerrillo *et al.* 2021). Alternativamente, la gestión del sombreado ejercido por el arbolado circundante o la vegetación arbustiva también puede utilizarse para limitar el desarrollo del estrato herbáceo y con ello disminuir la competición a la que se ven sometidos los plantones. Además, la gestión del sombreado conlleva a una mejora del microclima (al reducir la demanda evaporativa) y facilita, en su conjunto, el establecimiento y desarrollo de los plantones. Estas interacciones positivas (o mecanismos de facilitación) entre la vegetación existente (en general de tipo leñoso) y el regenerado natural o artificial han sido observadas, en particular, en ambientes adversos (Gómez-Aparicio *et al.* 2004).

Por todo ello, disponer de experiencias diseñadas científicamente, capaces de proveer información contrastada, es clave para reducir el fracaso en futuras plantaciones.

En las fichas adjuntas, se exponen los resultados obtenidos en el marco de unas plantaciones forestales demostrativas, establecidas y monitoreadas en el marco de los proyectos CANOPEE y ACCLIMAFOR, financiados por el Programa INTERREG V-A España-Francia-Andorra (POCTEFA). Dichas plantaciones incorporan en su diseño criterios de migración asistida y de facilitación planta-planta.

Ejemplos: las plantaciones demostrativas

PLANTACIONES EN LA VERTIENTE SUR DEL PIRINEO

Lladurs y Gòsol, Catalunya

Diseño de la plantación

Durante la primavera de 2018, se llevó a cabo, en la vertiente sur del Pirineo (Cataluña), una plantación

demostrativa en el interior y zona adyacente de seis bosquetes (de entre 0,2 y 0,4 ha) realizados en 2011 para promover la regeneración de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.). Tres de los bosquetes se encontraban localizados a 1200 m de altitud, en el “Bosque de Vilanova” (municipio de Lladurs, comarca del Solsonès) y los tres restantes en la finca de “La Collada” (municipio de Gòsol, comarca del Berguedà), a 1400 m de altitud (Figura. 1).



Figura 1. Bosquetes para promover la regeneración de pino silvestre en Lladurs (izquierda) y Gósol (derecha) en los que se llevaron a cabo las plantaciones demostrativas.

En cada bosquete se establecieron 120 plantones, de los cuales la mitad (60) eran de la especie local dominante (pino silvestre) y la otra mitad (60) de pino laricio (*Pinus nigra* Arn.), la especie que se pretende migrar a nivel altitudinal. Para cada especie, se utilizaron 2 procedencias: una procedencia local (*pirenaica*) y una procedencia de ámbitos más áridos (*mediterránea*). Con el objeto de testar el efecto del sombreado en la supervivencia y desarrollo de los plantones, se plantaron la mitad de ellos en el interior de los bosquetes (60 plantones, 15 por combinación de

especie y procedencia) y la otra mitad bajo el dosel de la masa circundante. Además, y con el objetivo de evaluar el papel de las interacciones plantón-vegetación, se establecieron los individuos bajo tres condiciones microambientales: “sin competición herbácea” (tras aplicación de herbicida), “bajo arbusto nodriza” y “competición herbácea” (Figura. 2).

Tras la plantación se registró anualmente, en cada bosquete, la supervivencia y estado (vital, decaído) de todos los plantones.



Figura 2. Vista panorámica de los bosquetes de Lladurs (izquierda) y detalle de un plantón de pino silvestre plantado en el interior de uno de los bosquetes. (derecha).

Resultados y conclusiones

Tres años después de la plantación, la supervivencia de los plantones establecidos tras la aplicación de herbicida fue muy baja, posiblemente por problemas asociados a la aplicación del producto. Por ello, se decidió prescindir de esta modalidad y evaluar los resultados únicamente en lo referente a los microambientes “con competición herbácea” y “bajo arbusto nodriza”.

En general, la supervivencia de los plantones fue superior en la finca de Gòsol, alcanzando niveles alrededor del 75%. Por su localización, esta finca presenta una pluviometría superior a la de Lladurs y, en general, un estrato herbáceo menos desarrollado que debería favorecer la supervivencia y desarrollo de los plantones (Figura 3).

de la evapotranspiración de los plantones. Tampoco puede descartarse que la reducción del desarrollo de la vegetación herbácea en la base del arbusto, inducida por el sombreado ejercido, reduzca la competición por los recursos del suelo a los que se ve sometido el plantón. Dicha competición parece ser particularmente intensa dado el bajo nivel de supervivencia (por debajo del 50%) de tres de las cuatro combinaciones de especie y procedencia testadas.

En cambio, cuando se analizan los plantones establecidos bajo el dosel de la masa forestal circundante, se observó una menor supervivencia de aquellos plantados bajo arbusto nodriza. En estas condiciones, la luz disponible para los plantones es muy reducida (por el efecto conjunto de la intercepción de luz por parte de la copa de los árboles y del arbusto) llegando a niveles probablemente letales para

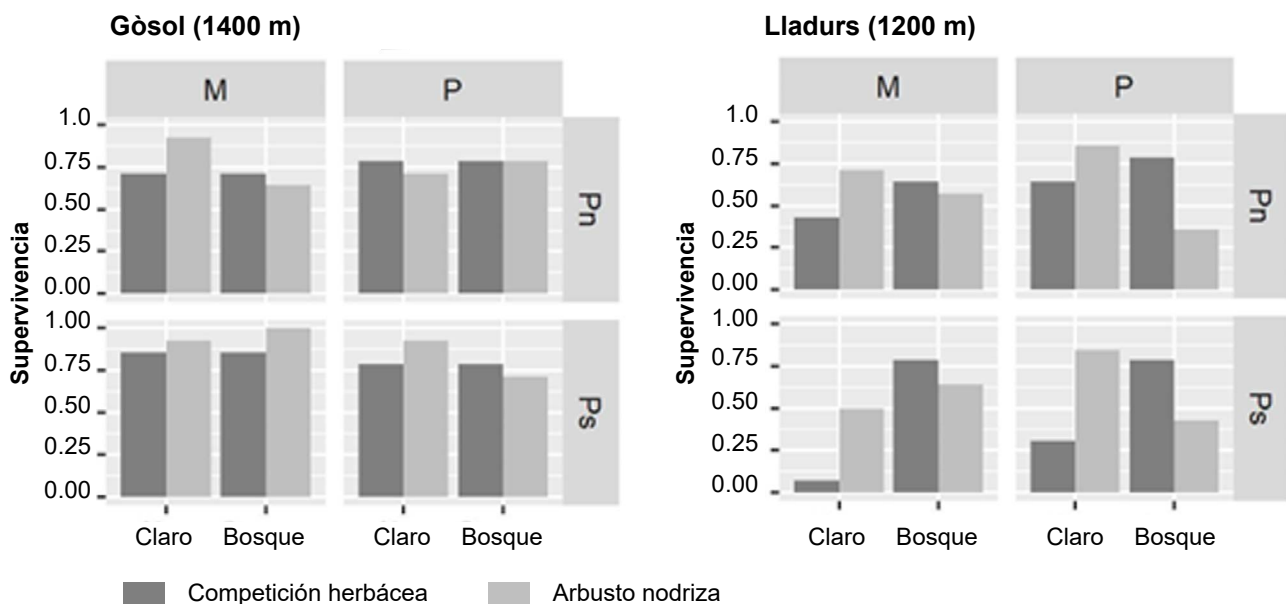


Figura 3. Supervivencia de los plantones establecidos en las fincas de Gòsol y Lladurs, en el interior del bosque (claro) y bajo el dosel de la masa circundante (bosque). Se muestra en gris oscuro los plantones establecidos sin control de la vegetación herbácea y en gris claro aquellos establecidos bajo un arbusto nodriza. Las dos figuras superiores corresponden a los plantones de *Pinus nigra* (Pn) y las dos figuras inferiores a los plantones de *Pinus sylvestris* (Ps). La columna izquierda representa los plantones de procedencia mediterránea (M) y la derecha los plantones de procedencia pirenaica (P).

En la finca de Lladurs, localizada a menor altitud y sometida a un régimen hídrico menos favorable, se observó un aumento de la supervivencia de los plantones establecidos en el claro cuando se desarrollaban bajo la protección de un arbusto nodriza. Dichos resultados apuntan a un proceso facilitador del arbusto nodriza, mediado probablemente por la graduación de la radiación y la consiguiente reducción

su supervivencia, dado el temperamento de las dos especies (de media luz en los primeros estadios de desarrollo).

Tras tres periodos vegetativos, no se observaron diferencias notables de supervivencia entre las especies y procedencias testadas. Dichos resultados presentan una doble lectura. Por un lado, muestran

la robustez de la especie y procedencia local (pino silvestre del Pirineo) que se comporta de igual forma (a nivel de supervivencia) que los plantones de especies y procedencias características de ámbitos más exigidos a nivel hídrico. Por otro lado, los resultados muestran la capacidad del pino laricio y de las procedencias mediterráneas de sobrevivir y establecerse en estos terrenos y por tanto la pertinencia de su potencial uso para fines repobladores ante un escenario de cambio climático severo.

Finalmente es importante mencionar la necesidad de seguir monitoreando a corto y medio plazo el devenir de estas plantaciones, para evaluar con mayor detalle el desarrollo y crecimiento de las distintas especies y procedencias para, con ello, disponer de mayor información acerca de la pertinencia de su uso para fines repobladores.

Montes públicos y privados del País Vasco

Diseño de la plantación

A lo largo del periodo 2020-2022 se establecieron plantaciones con diversas especies y en un conjunto de montes públicos y privados del País Vasco con el objetivo de testar su capacidad de adaptación al cambio climático (Figura. 4). Las especies utilizadas fueron: *Pinus pinaster*, *Abies grandis*, *Cedrus atlantica*, *Cryptomeria japonica*, *Picea sitchensis*, *Pinus taeda*, *Pinus brutia* y *Pinus radiata* (variedades comerciales y resistentes a la banda roja).

Asimismo, se efectuaron plantaciones en las que se testaron distintas procedencias de *Pinus pinaster*: (i) procedencias vascas (A1, B1, Lapzide, Arza), (ii) aquitanas (VG2, VG3), (iii) gallegas (Bóveda y Vilalba) y (iv) del Valle del Tiétar.



Figura 4. Localización de las plantaciones (puntos amarillos, izquierda) y detalle del vivero en el que se produjeron algunos de los plantones utilizados (derecha).

PLANTACIONES EN LA VERTIENTE NORTE DEL PIRINEO

Durante el mes de febrero de 2020 se llevó a cabo una plantación experimental de abeto Douglas en Celles (Ariège, Occitanie), en la vertiente norte del Pirineo francés (Figura. 5). El objetivo de la plantación era testar dos procedencias distintas a las utilizadas históricamente en la zona en relación a la resistencia a la sequía estival. Además, se pretendía comparar, a medio plazo, las diferencias de productividad entre las dos nuevas procedencias y la utiliza-

da con anterioridad en el mismo sitio, que se cortó a hecho el invierno anterior (en 2019).

La plantación se realizó sobre 10 ha de una finca localizada a una altitud de 650-700 m, en una zona de pendiente moderada (del 30% al 40%) y orientación norte. El suelo es profundo (> 60m), de textura franco-limosa y acidez moderada (pH = 6).

Las dos procedencias que se testaron eran: Luzette y Washington 2. La plantación se realizó en un marco de 3 x 3 m (1100 individuos/ha), utilizándose para ello plantones en contenedor de 200 cm³ (Figura 6).

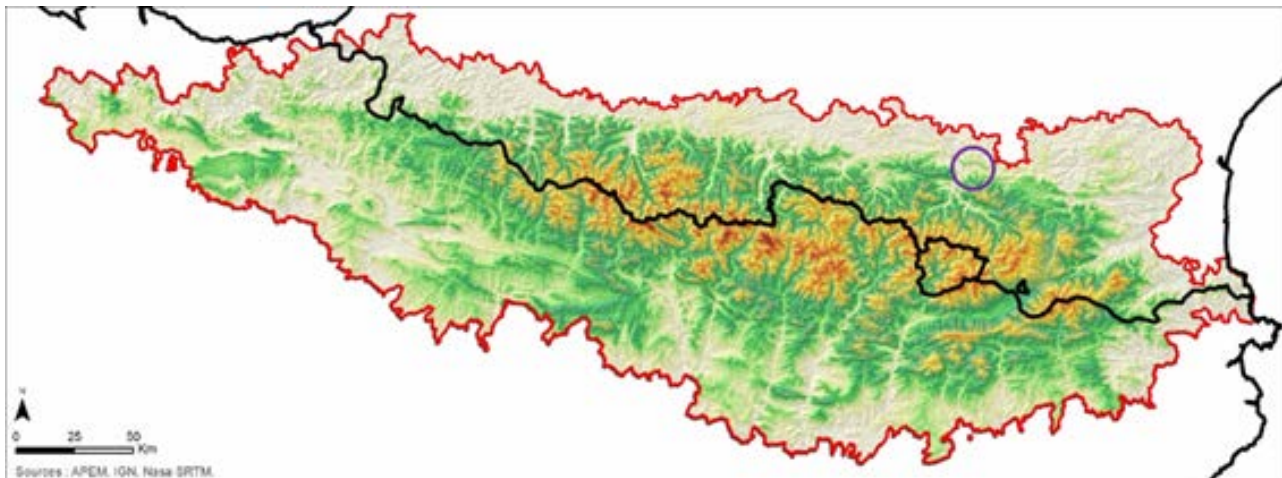


Figura 5. Localización de la plantación experimental en el macizo pirenaico (círculo morado)

Dos meses después de la plantación (abril 2020), se caracterizó en campo la altura, el estado sanitario y los daños potenciales por ramoneo en los plantones establecidos. Se proyecta repetir estas medidas 1, 2, 3 y 5 años después de la plantación (y a partir de ese momento cada 5 años).

Rieucazé, Haute-Garonne, Occitanie

Diseño de la plantación

El objetivo de la plantación era testar la idoneidad de transformar un monte medio mixto de roble, haya

y castaño en plantaciones de abeto de Douglas. Al mismo tiempo, se pretendía testar dos tipos de procedencia distintas (Luzette y Californiana) con el objeto de determinar cuál de ellas presentaba una mayor resistencia a la sequía. La plantación se llevó a cabo durante el mes de febrero de 2019 en Rieucazé (Haute-Garonne, Occitanie), en la vertiente norte del Pirineo francés (Figura 7).

La plantación se estableció sobre 2 hectáreas de la formación anterior que se cortaron a hecho durante el invierno de 2017-2018. A efectos comparativos, se conservó una pequeña parcela sin cortar. El invier-



Figura 6. Detalle de los plantones de abeto de Douglas establecidos. La imagen de la izquierda muestra la procedencia Luzette y la de la derecha la procedencia Washington 2.

no siguiente (2019) se establecieron plantones de ambas procedencias distribuidos en 3 parcelas: una parcela con la procedencia Luzette, una parcela con la procedencia Californiana y una parcela con ambas procedencias. Los plantones se establecieron a raíz desnuda siguiendo un marco de plantación de 4 x 3 m (833 individuos /ha).

Tras la plantación, se caracterizó el crecimiento en altura, el estado sanitario y los daños por ramoneo sufridos por los plantones. Ese mismo seguimiento se llevará a cabo anualmente los 5 primeros años tras la plantación y quinquenalmente a partir del año 5.

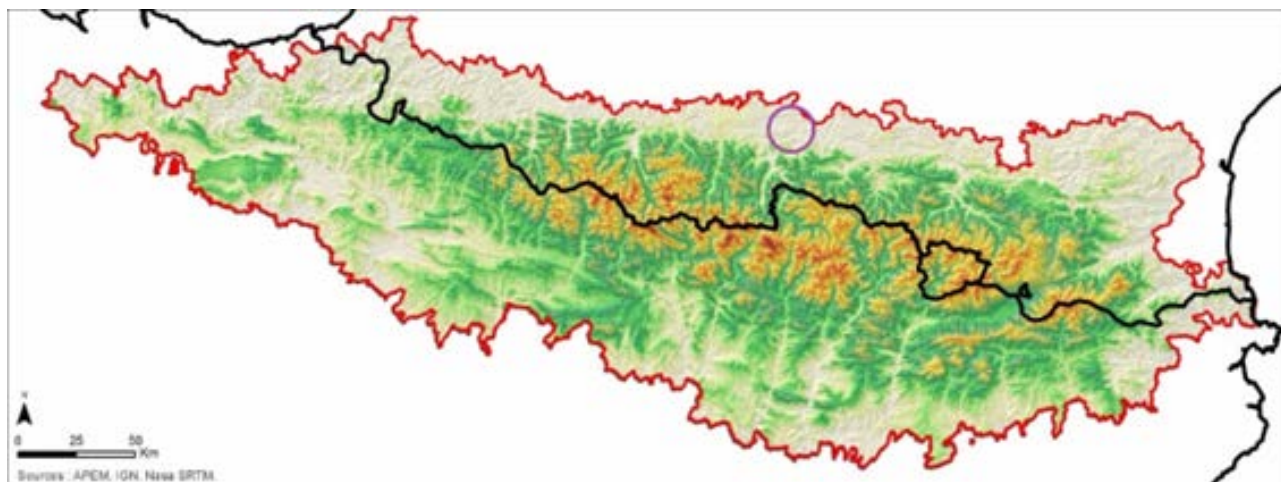


Figura 7. Localización de la plantación experimental en el macizo pirenaico (círculo morado)

FICHAS DESCRIPTIVAS DE LAS PLANTACIONES REALIZADAS EN EL MARCO DE LOS PROYECTOS CANOPEE Y ACCLIMAFOR

	Región	Formación forestal	Tratamiento	Densidad pies/ha	Año	Responsable
1	Occitania	Abeto Douglas (<i>Pseudotsuga menziesii</i>)	Testar 2 procedencias (Luzette y California) y su combinación	780	2018	CNPF
2	Occitania	Abeto Douglas (<i>Pseudotsuga menziesii</i>)	Testar 2 procedencias (Luzette y Washington) y su combinación	1.100	2020	CNPF
3	Occitania	Roble pubescente (<i>Quercus pubescens</i>) - Provenance Languedoc	Provocar hibridación con el roble albar colindante (Kremer <i>et al.</i> , 2020)	1.714	2020	ONF
4	Occitania	Roble albar (<i>Quercus petraea</i>) - Provenance Gascogne	Provocar hibridación con el roble pubescente colindante (Kremer <i>et al.</i> , 2020)	1.064	2020	ONF
5	Cataluña	Pino laricio (<i>Pinus nigra</i> Arn.) / Pino silvestre (<i>P. sylvestris</i>)	Testar 2 procedencias de cada especie: una local (pirenaica) y una de ámbitos más áridos (mediterránea). Plantación experimental en bosquetes abiertos en una masa de pino silvestre	300-600	2020	CTFC

Bibliografía

Gómez-Aparicio L., Zamora R., Gómez J.M., Hódar J.A., Castro J., Baraza E. 2004. Applying plant positive interactions to reforestation in Mediterranean mountains: a meta-analysis of the use of shrubs as nurse plants. *Ecological Applications* 14: 1128–1138.

Mueller J.M., Hellmann J.J. 2008. An assessment of invasion risk from assisted migration. *Conservation Biology* 22(3): 562-567.

Navarro-Cerrillo R., Ceacero C.J., Coello J., del Campo A. 2021. Control de la competencia en repoblaciones forestales. En: Pemán J., Navarro-Cerrillo R., Prada M.A., Serrada R. (coord.). *Bases técnicas y ecológicas del proyecto de repoblación forestal*.

Tomo 1. pp 884-935. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Madrid.

Serrada R., Aroca M.J., Roig S., Fravo A., Gómez V. 2011. Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en el sector forestal. *Notas sobre gestión adaptativa de las masas forestales ante el cambio climático*. Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino. Madrid. 129 p. ISBN: 978-84-491-1131-0.

Ste-Marie C., Nelson E.A., Dabros A., Bonneau M.E. 2011. Assisted migration: Introduction to a multifaceted concept. *The Forestry Chronicle* 87(6): 724-730.

