CONAMA 2026

Diversidad genética para bosques resilientes.

El proyecto OptFORESTS

Edita: Fundación Conama

Año: 2026

Este documento está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.

Personas autoras de la presente comunicación técnica

Autor Principal de la comunicación: Eva Vera Jiménez. Técnico Superior. Gerencia de I+D.TRAGSA.

Otros Autores: Jesús María Estrada Villegas. Jefe de Grupo de Actuaciones y Proyectos. Gerencia de Innovación Operacional. TRAGSA

Francisco Jose Lario Leza. Responsable de Proyectos del Vivero de Maceda. TRAGSA

Beatriz Cuenca Valera. Responsable de Actuaciones y Proyectos del Vivero de Maceda. TRAGSA

Laura Luquero Ramos. Jefa de Departamento. Gerencia de I+D. TRAGSA

Maria Regina Chambel. Titulada Superior de Investigación. ICIFOR-INIA-CSIC

José María Climent. Científico Titular. ICIFOR-INIA-CSIC

Ricardo Alia Miranda. Profesor de Investigación. ICIFOR-INIA-CSIC

Índice

Resumen **4**

1. Introducción, antecedentes y contexto **5**

1.1. Los bosques europeos frente al cambio climático 5

1.2. La diversidad genética como base de la adaptación y resiliencia forestal 5

1.3. Recursos genéticos forestales y materiales forestales de reproducción 6

1.4. Influencia de la gestión forestal sobre la diversidad genética 7

1.5. Antecedentes y justificación del proyecto europeo OptFORESTS 7

2. Estructura y paquetes de trabajo del proyecto OptFORESTS **8**

3. España en el proyecto OptFORESTS **9**

3.1. Establecimiento de nuevos ensayos genéticos forestales 9

3.1.1. Establecimiento de ensayos genéticos mediterráneos 10

3.1.2. Establecimiento de un nuevo ensayo genético atlántico 12

3.2. Evaluación de caracteres adaptativos en materiales clonales de Castanea spp. 12

3.2.1. Respuesta fisiológica al estrés hídrico 13

3.2.2. Variabilidad entre clones e interacción con las condiciones ambientales 14

3.2.3. Aplicación de espectroscopía de infrarrojo cercano para la detección del estrés 15

4. Conclusiones **16**

5. Bibliografía **17**

Resumen

El proyecto europeo OptFORESTS, financiado por el programa Horizonte Europa, reúne a 19 entidades de 12 países europeos con el objetivo de mejorar la conservación, restauración y capacidad adaptativa de los bosques europeos frente al cambio climático mediante la conservación de la diversidad genética y la optimización del uso de los materiales forestales de reproducción (MFR). En particular en España participan en el consorcio el Instituto de Ciencias Forestales (ICIFOR-INIA-CSIC) y el Grupo TRAGSA, y cuenta con la colaboración del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO).

El proyecto se estructura en diferentes paquetes de trabajo, que abordan diferentes aspectos relacionados con la conservación y utilización de los recursos genéticos forestales:

- La caracterización de la diversidad y capacidad adaptativa a partir de ensayos genéticos ya existentes.
- El establecimiento de nuevas parcelas de ensayo integradas en una red europea con el fin de evaluar, bajo diferentes condiciones ambientales, el comportamiento y la capacidad adaptativa de distintos materiales forestales.
- La integración de la diversidad genética en la gestión forestal y evaluación de los efectos de las prácticas selvícolas sobre esta.
- El estudio de la variación genética de caracteres relacionados con la adaptación y el desarrollo de estrategias de mejora que mantengan una elevada diversidad genética.
- La disponibilidad, producción y suministro de MFR para los bosques futuros.
- Los aspectos socioeconómicos, de percepción y gobernanza asociados a su utilización.

Una de las principales líneas de trabajo desarrolladas en España se enmarca en el establecimiento de nuevas parcelas de ensayo integradas en la red europea. En este contexto, durante los primeros meses de 2026 y con el apoyo del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) se completó la implantación de dos nuevas plantaciones de ensayo en el Centro Nacional de Recursos Genéticos Forestales (CNRGF) de Valsaín que se integrarán en la mencionada red europea. La primera incluye cinco especies y ocho procedencias por especie y tiene como objetivo evaluar su comportamiento y capacidad adaptativa en ambientes contrastados. La segunda, formada por dos especies y dos procedencias por especie, está orientada a evaluar cómo la competencia entre especies y procedencias influye en diferentes rasgos fenotípicos, como el crecimiento y la forma. Y en la actualidad se está instalando en la provincia de Ourense la segunda parcela de ensayo de evaluación de adaptación de especies y procedencias en ambiente atlántico.

Otra de las contribuciones de los socios españoles al proyecto, ha sido la evaluación de tres ensayos clonales de *Castanea spp.* con el objetivo de caracterizar la respuesta de diferentes genotipos frente al estrés hídrico. Para ello, se evaluó el crecimiento y la supervivencia, y con parámetros fisiológicos de respuesta al estrés, como el contenido de clorofila (CC), la eficiencia fotoquímica máxima del fotosistema II (Fv/Fm) y el índice de rendimiento fotosintético (PI). Se incorporaron también técnicas de espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR). Los resultados muestran, en general, valores inferiores

de los parámetros fisiológicos en los individuos sometidos a estrés, siendo el PI el indicador que mostró una mayor sensibilidad a las condiciones de estrés. La magnitud de esta respuesta varió entre localizaciones, con diferencias más acusadas en las parcelas sometidas a condiciones de mayor estrés hídrico. Por su parte, la espectroscopía NIR mostró resultados prometedores tanto para la detección del estrés como para la diferenciación de clones según su respuesta.

En conjunto, los resultados obtenidos contribuirán a ampliar el conocimiento sobre la diversidad genética y la capacidad adaptativa de las especies forestales frente al cambio climático, proporcionando información científica de apoyo para la selección y utilización de MFR, la conservación de los recursos genéticos, la restauración forestal y el desarrollo de estrategias de adaptación.

1. Introducción, antecedentes y contexto

1.1. Los bosques europeos frente al cambio climático

Los ecosistemas forestales desempeñan un papel fundamental en la conservación de la biodiversidad, la regulación del ciclo del carbono y el mantenimiento de numerosos servicios ecosistémicos (Vizzarri, 2024). Además, constituyen una fuente de recursos renovables y un componente clave para el establecimiento de una bioeconomía sostenible (Muscat et al., 2021).

Sin embargo, el cambio climático está incrementando las presiones sobre los bosques europeos mediante el aumento de las temperaturas, la intensificación de las sequías y las olas de calor, y la aparición o expansión de plagas y enfermedades. Estas perturbaciones pueden comprometer la capacidad de adaptación, regeneración y persistencia de numerosas especies forestales, poniendo de manifiesto la necesidad de desarrollar estrategias de gestión que favorezcan su resiliencia (Knutzen et al., 2025).

En este contexto, la Nueva Estrategia de la Unión Europea en favor de los Bosques para 2030 promueve la protección, restauración y gestión sostenible de los ecosistemas forestales, reforzando su capacidad de adaptación al cambio climático y su contribución a la conservación de la biodiversidad (Deutscher et al., 2026).

1.2. La diversidad genética como base de la adaptación y resiliencia forestal

La diversidad genética constituye uno de los principales mecanismos que permiten a las poblaciones forestales responder a las variaciones ambientales y mantener su capacidad evolutiva a lo largo del tiempo (Milesi et al, 2024). Su composición y distribución están determinadas por la interacción de cuatro procesos evolutivos fundamentales: mutación, flujo génico, deriva genética y selección natural.

Los tres últimos pueden verse modificados de manera significativa por las prácticas de gestión forestal (Aravanopoulos, 2016).
Una mayor diversidad, tanto entre especies como entre individuos de una misma especie, puede contribuir a incrementar la resistencia y resiliencia de los bosques frente a perturbaciones bióticas y abióticas. Asimismo, la combinación de especies o procedencias con características complementarias puede favorecer la productividad y reducir la competencia por los recursos (Jactel et al., 2017).

No obstante, estas relaciones dependen tanto de las características genéticas de los materiales forestales como de las condiciones ambientales en las que se desarrollan. En este contexto, los ensayos de procedencias establecidos en diferentes localizaciones constituyen herramientas fundamentales para evaluar el comportamiento de distintos materiales genéticos bajo condiciones ambientales contrastadas, identificar patrones de adaptación local y analizar las interacciones genotipo × ambiente. En este sentido, el establecimiento de ensayos que integran diferentes especies y procedencias en una misma parcela representa un enfoque novedoso, al permitir evaluar y comparar su comportamiento bajo condiciones ambientales comunes, así como analizar las diferencias en su capacidad de adaptación. Esta información resulta esencial para orientar la selección de materiales forestales de reproducción y desarrollar estrategias de gestión que favorezcan la adaptación y resiliencia de los bosques frente al cambio climático (Leites & Benito Garzón, 2023).

1.3. Recursos genéticos forestales y materiales forestales de reproducción

La conservación y el uso sostenible de los recursos genéticos forestales (RGF) desempeñan un papel fundamental en el mantenimiento de la diversidad genética y la capacidad de adaptación de los bosques frente al cambio climático. En este contexto, la adecuada selección y utilización de materiales forestales de reproducción (en adelante MFR) constituye una herramienta clave para incorporar criterios genéticos y adaptativos en las actuaciones de gestión, restauración y repoblación forestal (Rogelja et al., 2023).

La elección de estos materiales debe considerar no solo su procedencia y adaptación a las condiciones locales, sino también su tolerancia a factores de estrés tanto bióticos como abióticos, su comportamiento en diferentes ambientes y el mantenimiento de una diversidad genética suficiente (Konnert et al., 2015; Ivetić et al., 2016).

De este modo, estrategias como el flujo génico asistido y la migración asistida ofrecen nuevas posibilidades para favorecer la adaptación forestal, aunque requieren información científica que permita evaluar sus beneficios y posibles riesgos (Aitken & Whitlock, 2013).

Asimismo, resulta necesario garantizar la disponibilidad y el suministro de MFR diversos y adaptados, reforzando la capacidad del sector viverístico para responder a las necesidades futuras de restauración y gestión forestal (OptFORESTS, 2025).

1.4. Influencia de la gestión forestal sobre la diversidad genética

La gestión forestal influye sobre la diversidad y estructura genética de las poblaciones arbóreas a distintas escalas. A escala de paisaje, la conectividad entre masas y la fragmentación de los hábitats pueden modificar los patrones de flujo génico, mientras que, a escala de rodal, determinadas intervenciones selvícolas pueden favorecer la selección de individuos con características específicas (Ratnam et al., 2014).

La fase de regeneración resulta especialmente relevante, ya que condiciona la composición genética de las generaciones futuras. Mientras que la regeneración natural depende de la diversidad genética de las poblaciones existentes y de procesos como el flujo de polen y la dispersión de semillas, la regeneración artificial permite introducir materiales de distintas procedencias, siempre que se garantice su adecuación a las condiciones ambientales (Ivetić et al., 2016).

Por tanto, integrar la diversidad genética en la planificación forestal constituye un elemento fundamental para compatibilizar los objetivos de conservación, productividad y adaptación al cambio climático (FAO, s. f.).

1.5. Antecedentes y justificación del proyecto europeo OptFORESTS

Aunque Europa dispone de una amplia experiencia en programas de mejora genética, ensayos de procedencias y conservación de recursos genéticos forestales, todavía existen importantes limitaciones en el conocimiento sobre el comportamiento adaptativo de determinadas especies, procedencias y genotipos bajo condiciones ambientales cambiantes (Aspalter et al., 2025; Olsson et al., 2023).

Para contribuir a superar estas limitaciones surge el proyecto europeo OptFORESTS (Project GA nº 101081774 - HORIZON-CL6-2022-BIODIV-01), financiado por el programa Horizonte Europa de la Unión Europea y que reúne a un consorcio de 19 entidades europeas de 12 países diferentes coordinados por el Instituto Nacional de Investigación para la Agricultura, la Alimentación y el Medio Ambiente de Francia (INRAE). El proyecto, que se está desarrollando durante el periodo 2022-2027, tiene como objetivo promover la conservación y utilización sostenible de los recursos genéticos forestales para mejorar la capacidad adaptativa de los bosques europeos frente al cambio climático.

Para ello, combina la evaluación de ensayos genéticos existentes con el establecimiento de una red europea de nuevos ensayos genéticos, el estudio de caracteres adaptativos, la integración de la

diversidad genética en la gestión forestal y el desarrollo de estrategias para mejorar la producción y el suministro de MFR.

Asimismo, OptFORESTS incorpora aspectos socioeconómicos, de gobernanza y transferencia de conocimientos, con el fin de facilitar la aplicación de los resultados científicos en la gestión forestal y en el sector viverístico.

En conjunto, el proyecto se articula en torno a cinco objetivos específicos relacionados con la selección de MFR diversos y adaptados, la gestión forestal sostenible, la diversificación de la producción de planta, el desarrollo de herramientas y soluciones basadas en la naturaleza y la restauración de ecosistemas forestales degradados (Comisión Europea, 2022).

2. Estructura y paquetes de trabajo del proyecto OptFORESTS

Para alcanzar los objetivos planteados, OptFORESTS se estructura en ocho paquetes de trabajo (WP, *Work Packages*) que abordan de forma complementaria diferentes aspectos relacionados con la conservación, caracterización, mejora y utilización sostenible de los recursos genéticos forestales (Cuadro 1). Estos paquetes integran actividades de investigación, experimentación, gestión forestal, producción de materiales forestales de reproducción (MFR), análisis socioeconómico y transferencia de conocimientos.

Cuadro 1. Paquetes de trabajo del proyecto europeo OptFORESTS y sus principales objetivos.
Fuente: Elaboración propia a partir de la información del proyecto OptFORESTS (Comisión Europea, 2022).

WPs		Principales objetivos
WP1	Coordinación y gestión del proyecto	Coordinar las actividades, gestionar los recursos y supervisar el cumplimiento de los objetivos del proyecto.
WP2	Conservación y utilización de los recursos genéticos forestales	Evaluar ensayos genéticos existentes y generar recomendaciones para la conservación y utilización de MFR, incluyendo estrategias de flujo génico y migración asistida.
WP3	Nuevos ensayos genéticos para la adaptación al cambio climático	Establecer una red europea de ensayos para evaluar el comportamiento de especies y procedencias en ambientes contrastados y estudiar sus interacciones.
WP4	Gestión forestal y diversidad genética	Analizar los efectos de la gestión forestal sobre la diversidad genética y desarrollar prácticas selvícolas que favorezcan la adaptación y resiliencia de los bosques.

WP5	Mejora genética con y para una elevada diversidad genética	Evaluar caracteres adaptativos, su heredabilidad y correlaciones genéticas, y desarrollar estrategias de mejora que mantengan una elevada diversidad genética.
WP6	Suministro de MFR para los bosques europeos del futuro	Analizar el sector viverístico y desarrollar estrategias que garanticen la producción y disponibilidad de MFR diversos y adaptados.
WP7	Aspectos socioeconómicos y gobernanza de los recursos genéticos forestales	Evaluar los servicios ecosistémicos, las percepciones y las barreras socioeconómicas e institucionales relacionadas con la utilización de los recursos genéticos forestales.
WP8	Comunicación y sistemas de información	Difundir los resultados, facilitar el intercambio de conocimientos y mejorar los sistemas de información y trazabilidad de los MFR.

3. España en el proyecto OptFORESTS

Participan en el consorcio del proyecto OptFORESTS el Instituto de Ciencias Forestales del CSIC (ICIFOR-INIA-CSIC) y el Grupo TRAGSA como entidades españolas y cuenta con el apoyo del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). Las actividades desarrolladas en España que se presentan en esta comunicación se encuadran principalmente en los paquetes de trabajo WP3 y WP5, mediante el establecimiento de nuevos ensayos genéticos forestales y la evaluación de caracteres fisiológicos relacionados con la respuesta al estrés hídrico y térmico en materiales clonales de *Castanea spp.,* seleccionados en anteriores proyectos de I+D desarrollados por el Grupo Tragsa en función de su tolerancia a *Phytophthora cinnamomi.*

3.1. Establecimiento de nuevos ensayos genéticos forestales

En el marco del WP3, se está estableciendo una red europea de 34 ensayos genéticos distribuidos en 17 países (Figura 1), orientada a estudiar la respuesta de diferentes materiales forestales bajo condiciones ambientales contrastadas. Como parte de esta iniciativa, en España se han implantado dos ensayos en ambiente mediterráneo y se está trabajando en la instalación de un tercero en ambiente atlántico.

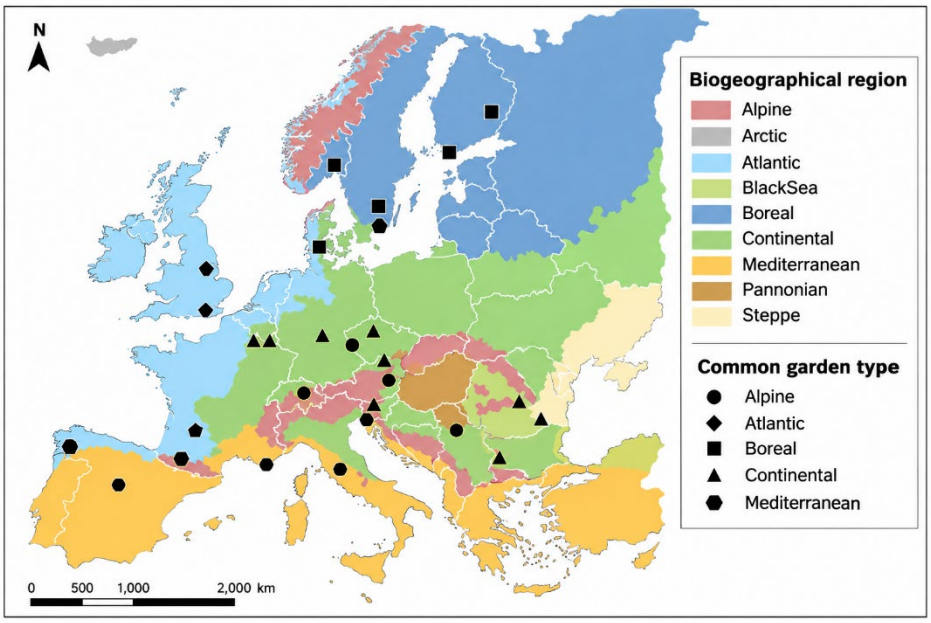


Figura 1. Distribución geográfica de los ensayos "genéricos" que se están estableciendo en el marco de la red europea del proyecto OptFORESTS.
Fuente: Westergren (2026)

La evaluación de materiales genéticos compartidos en distintas localizaciones europeas permitirá analizar las diferencias en su comportamiento y estudiar las interacciones genotipo × ambiente. A largo plazo, los resultados obtenidos contribuirán a identificar materiales con un comportamiento favorable bajo diferentes escenarios ambientales, proporcionando información científica que facilite la selección de materiales forestales de reproducción para actuaciones de conservación, restauración y gestión forestal sostenible.

3.1.1. Establecimiento de ensayos genéticos mediterráneos

A principios de 2026 se completó la implantación de dos nuevos ensayos genéticos forestales (Figura 2) en el Centro Nacional de Recursos Genéticos Forestales de Valsaín (Segovia), con el apoyo del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO).



Figura 2. Perímetro de la parcela en la que se han establecido los ensayos genéticos forestales del proyecto OptFORESTS en el Centro Nacional de Recursos Genéticos Forestales de Valsaín (Segovia) del MITECO.
Fuente: Elaboración propia a partir de ortofotografía del PNOA (IGN).

Su implantación requirió una fase previa de planificación y coordinación entre las entidades participantes, que incluyó la selección de especies y procedencias, la producción de los materiales vegetales, la preparación del terreno y la definición de los diseños experimentales.

El primero de los ensayos, de carácter genérico, incluye cinco especies forestales: *Pinus sylvestris, Pinus nigra, Pinus pinaster, Quercus petraea* y *Quercus pubescens*. Cada especie está representada por ocho procedencias, lo que supone un total de 40 procedencias de 18 países diferentes (Figura 3). Su objetivo es evaluar el comportamiento de diversos materiales genéticos bajo condiciones ambientales mediterráneas y estudiar su potencial de adaptación frente al cambio climático.

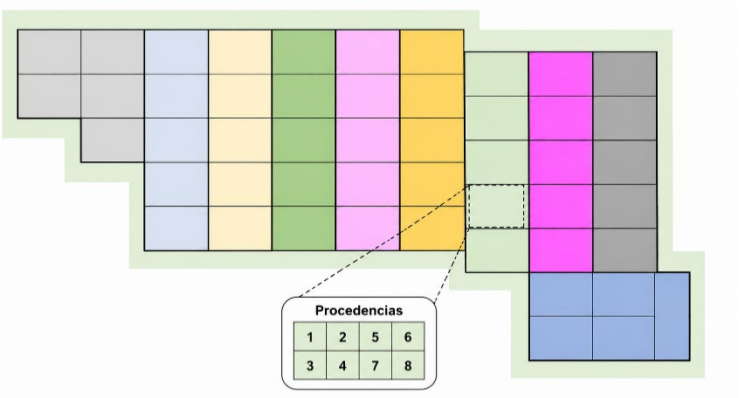


Figura 3. Esquema del diseño experimental del ensayo "genérico" establecido en Segovia. Los colores representan los diferentes bloques, en los que se distribuyen cinco especies forestales con ocho procedencias por especie. La franja verde claro exterior corresponde a la planta de borde.
Fuente: Elaboración propia. Grupo Tragsa e ICIFOR-INIA-CSIC (2026).

Por su parte, el segundo ensayo, orientado al estudio de la competencia, está constituido por dos especies forestales, *Quercus pubescens* y *Pinus nigra*, con dos procedencias por especie. Para *Quercus* se incluyen materiales procedentes de Italia y España, mientras que para *Pinus* se utilizan procedencias de España y Francia. Su diseño experimental permitirá analizar cómo las interacciones competitivas entre individuos de diferentes especies y procedencias pueden influir sobre determinados caracteres fenotípicos.

3.1.2. Establecimiento de un nuevo ensayo genético atlántico

De forma complementaria a los trabajos realizados en la provincia de Segovia, se está llevando a cabo la instalación de un nuevo ensayo genético forestal en la provincia de Ourense, destinado a evaluar el comportamiento de diferentes especies y procedencias bajo condiciones ambientales atlánticas. En concreto, el ensayo incluye cinco especies forestales: *Pinus pinaster*, *Prunus avium*, *Castanea sativa*, *Pinus sylvestris* y *Quercus petraea*, con ocho registros de procedencia por especie, correspondientes a materiales de 16 países diferentes.

Su incorporación a la mencionada red europea de ensayos genéticos permitirá ampliar la representación de ambientes en los que se evalúan los materiales forestales y facilitará la comparación de sus respuestas entre regiones biogeográficas.

El seguimiento a largo plazo de estos ensayos establecidos contribuirá a generar información sobre la adaptación de especies y procedencias a diferentes condiciones ambientales, proporcionando una base científica para orientar la utilización de materiales forestales de reproducción frente a los desafíos asociados al cambio climático.

3.2. Evaluación de caracteres adaptativos en materiales clonales de *Castanea spp*.

En el marco del WP5, el Grupo Tragsa ha desarrollado trabajos orientados a evaluar caracteres fisiológicos relacionados con la respuesta al estrés hídrico y térmico en materiales clonales de *Castanea spp*. seleccionados, con el objetivo de identificar caracteres de interés para la mejora genética y la adaptación al cambio climático.

Para ello, se utilizaron tres ensayos clonales establecidos en diferentes condiciones ambientales: Monte Seixo (A Coruña) y San Xoán de Lagostelle (Lugo), de clima atlántico, y El Rodanillo (León), de mayor continentalidad. Se seleccionaron diez clones con diferentes antecedentes de tolerancia a *Phytophthora cinnamomi*, incluyendo clones comerciales, clones no registrados por no haber superado las pruebas de tolerancia a este patógeno y un clon de *Castanea sativa* utilizado como control, con un total de 253 árboles evaluados.

Las mediciones se realizaron en distintas campañas entre 2023 y 2025, evaluando el contenido de clorofila (CC), la eficiencia fotoquímica máxima del fotosistema II (Fv/Fm) y el índice de rendimiento fotosintético (PI). Asimismo, se registraron espectros de infrarrojo cercano (NIR) para estudiar su aplicación en la estimación de parámetros fisiológicos.

De forma complementaria, se utilizaron datos de ensayos de estrés hídrico realizados en condiciones controladas con plántulas de *Castanea sativa* en el vivero del Grupo Tragsa en Maceda (Ourense).

3.2.1. Respuesta fisiológica al estrés hídrico

Los resultados obtenidos en los ensayos de plántulas sometidas a estrés hídrico en condiciones controladas en las instalaciones del vivero del Grupo Tragsa, mostraron reducciones estadísticamente significativas en el contenido de clorofila (CC), la eficiencia fotoquímica máxima del fotosistema II (Fv/Fm) y el índice de rendimiento fotosintético (PI) respecto a las plantas control ($p < 0,05$). Asimismo, se observaron diferencias significativas entre las poblaciones evaluadas en el contenido de clorofila.

En el caso de los ensayos clonales de campo, los modelos lineales mixtos identificaron diferencias significativas entre localidades y clones para las tres variables, así como una interacción significativa entre localidad y estado de estrés, lo que indica que la respuesta fisiológica varió entre los ambientes evaluados.

Las mayores alteraciones se observaron en el ensayo de El Rodanillo, caracterizado por condiciones climáticas de mayor continentalidad, donde los tres indicadores disminuyeron significativamente entre campañas ($p < 0,001$ para CC y Fv/Fm; $p = 0,0002$ para PI). En Monte Seixo, únicamente se detectaron diferencias significativas en el PI ($p < 0,0001$), mientras que en San Xoán las diferencias fueron significativas para CC ($p = 0,0005$) y Fv/Fm ($p = 0,0464$), pero no para PI (Figura 4).

En conjunto, estos resultados ponen de manifiesto la influencia de las condiciones ambientales sobre el funcionamiento fisiológico de los árboles y destacan el potencial del PI como indicador de respuesta al estrés, aunque su sensibilidad depende de la localidad y de las condiciones de evaluación.

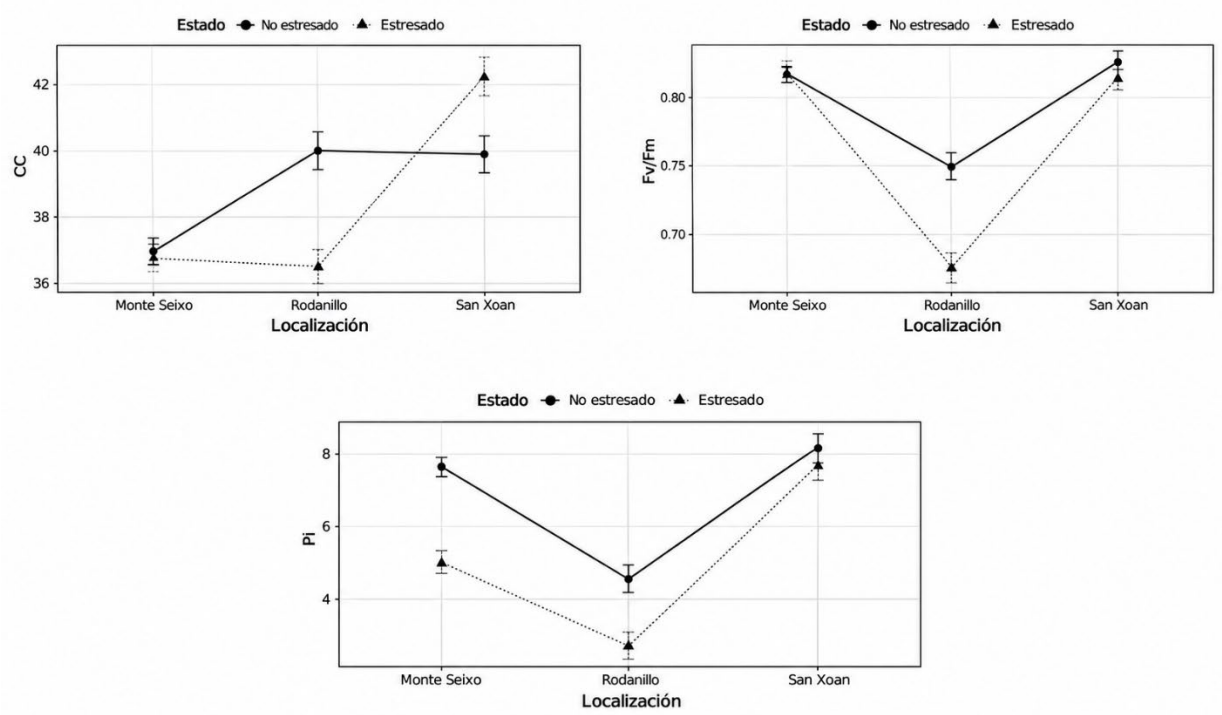


Figura 4. Variación del contenido de clorofila (CC), la eficiencia fotoquímica máxima del fotosistema II (Fv/Fm) y el índice de rendimiento fotosintético (PI) en materiales clonales de *Castanea spp*. evaluados en Monte Seixo, El Rodanillo y San Xoán de Lagostelle. Se representan las medias ajustadas ± error estándar correspondientes a las evaluaciones de julio de 2023 (no estresado) y septiembre de 2025 (estresado).
Fuente: TRAGSA (2026).

3.2.2. Variabilidad entre clones e interacción con las condiciones ambientales

El análisis individual de los clones permitió identificar diferencias en su comportamiento fisiológico y en la magnitud de su respuesta entre las campañas de evaluación.

En Monte Seixo, el índice de rendimiento fotosintético (PI) mostró disminuciones significativas en varios de los clones evaluados, mientras que otros, como Cs, P018 y P042, mantuvieron valores relativamente estables. En El Rodanillo, se observaron reducciones significativas de distintos parámetros fisiológicos en numerosos clones, aunque la magnitud de estas variaciones dependió del material genético considerado. Por su parte, San Xoán presentó una respuesta fisiológica menos acusada, con un menor número de diferencias significativas entre campañas (Figura 5).

En conjunto, estos resultados evidencian la existencia de variabilidad en la respuesta fisiológica de los materiales clonales y sugieren que su comportamiento puede estar condicionado por las características ambientales de cada localidad.

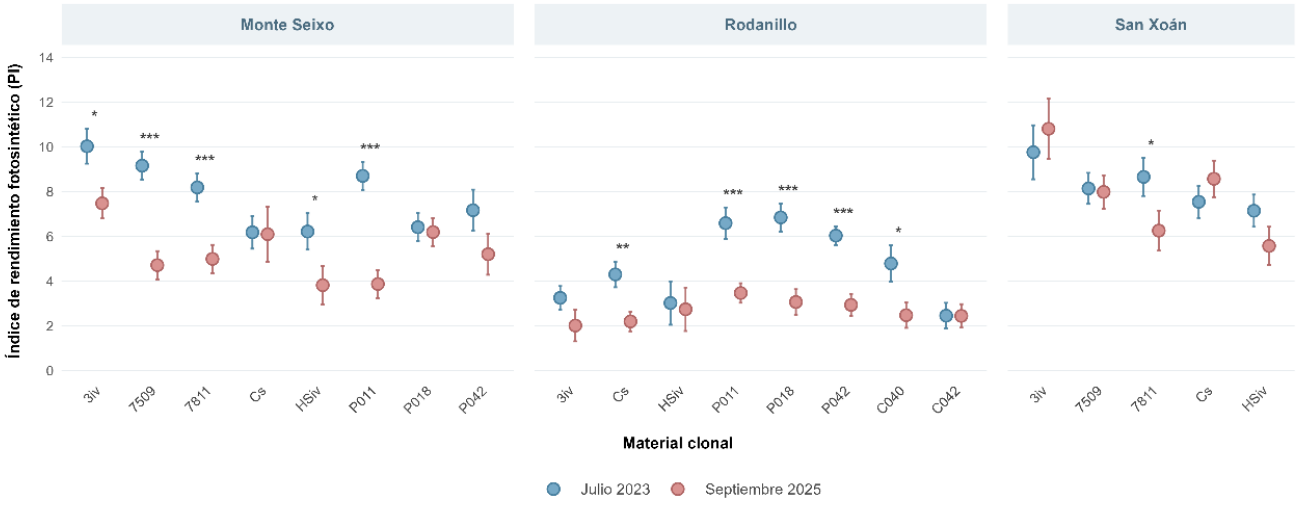


Figura 5. Variación del índice de rendimiento fotosintético (PI) en los materiales clonales de Castanea spp. evaluados en Monte Seixo, El Rodanillo y San Xoán de Lagostelle. Se representan las medias ajustadas mediante modelos lineales mixtos ± error estándar correspondientes a julio de 2023 y septiembre de 2025. Los asteriscos indican diferencias estadísticamente significativas entre campañas (* p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001).
Fuente: TRAGSA, 2026.

3.2.3. Aplicación de espectroscopía de infrarrojo cercano para la detección del estrés

De forma complementaria a las evaluaciones fisiológicas convencionales, se analizó el potencial de la espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR) como herramienta no destructiva para la detección del estrés y la estimación de parámetros fisiológicos en *Castanea* spp.

En los ensayos de plántulas realizados en condiciones controladas, los modelos de clasificación basados en información espectral permitieron diferenciar plantas sometidas a estrés hídrico y plantas control, alcanzando una exactitud del 91 % (Cuadro 2). Posteriormente, se desarrollaron modelos para estimar parámetros fisiológicos a partir de los espectros foliares obtenidos en los ensayos clonales de campo. Los modelos iniciales, desarrollados con datos de 2023, mostraron una capacidad predictiva moderada para el contenido de clorofila, por lo que se realizaron nuevas calibraciones incorporando las mediciones de 2025, con resultados variables entre materiales genéticos y condiciones de evaluación.

En conjunto, los resultados muestran el potencial de la espectroscopía NIR como herramienta complementaria para la caracterización fisiológica de materiales forestales mediante técnicas rápidas y no destructivas. No obstante, será necesario continuar con la validación de los modelos para mejorar su precisión y evaluar su aplicación en diferentes condiciones ambientales.

Cuadro 2. Matriz de confusión y resultados de clasificación del estrés hídrico mediante espectroscopía NIR. Fuente: TRAGSA, 2026.

Clase predicha	Entrenamiento · Observados		Validación externa · Observados	
	Control	**Estrés hídrico**	**Control**	**Estrés hídrico**
Control	35	3	14	1
Estrés hídrico	3	27	1	11
Sensibilidad	0,92		0,93	
Especificidad	0,90		0,92	
Exactitud global	**0,91**		**0,93**	

4. Conclusiones

Las actividades desarrolladas en España en el marco de OptFORESTS contribuyen a mejorar el conocimiento sobre la diversidad genética forestal y su papel en la adaptación de los bosques frente al cambio climático, mediante el establecimiento de nuevos ensayos genéticos y la evaluación de caracteres fisiológicos relacionados con la respuesta al estrés ambiental.

En el ámbito del WP3, el establecimiento de dos ensayos genéticos mediterráneos en Segovia y la instalación de un nuevo ensayo atlántico en la provincia de Ourense permitirán ampliar la red europea ensayos genéticos. El seguimiento a largo plazo de estas parcelas, junto con los datos provenientes de la red de parcelas genéticas europea en la que se engloban, proporcionará información sobre el comportamiento de las diferentes especies objeto de estudio y procedencias bajo condiciones ambientales, contribuyendo a mejorar los criterios de selección y utilización de materiales forestales de reproducción.

Por su parte, los resultados obtenidos en los ensayos clonales de *Castanea spp.* han permitido identificar diferencias significativas en la respuesta fisiológica entre materiales genéticos y localidades, evidenciando la influencia de las condiciones ambientales sobre los caracteres evaluados. Estas diferencias refuerzan la importancia de estudiar el comportamiento de los materiales genéticos en distintos ambientes antes de establecer recomendaciones de selección y utilización.

Asimismo, la espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR) ha mostrado resultados prometedores como herramienta complementaria para la detección del estrés hídrico y la estimación de parámetros fisiológicos.

En conjunto, los trabajos desarrollados contribuyen a generar información científica y herramientas de evaluación de interés para la conservación y utilización sostenible de los recursos genéticos forestales, así como para el desarrollo de estrategias de mejora genética y gestión forestal orientadas a favorecer la adaptación de los bosques al cambio climático.

5. Bibliografía

Aitken, S. N., & Whitlock, M. C. (2013). Assisted gene flow to facilitate local adaptation to climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 44*, 367–388. https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110512-135747

Aravanopoulos, F. A. (2016). Conservation and monitoring of tree genetic resources in temperate forests. *Current Forestry Reports, 2*, 119–129. https://doi.org/10.1007/s40725-016-0038-8

Aspalter, S., Ciceu, A., Landivar Albis, C. M., Chakraborty, D., & Schueler, S. (2025). Provenance variation in functional traits of European forest trees: Meta-analysis reveals effects of taxa and age despite critical research gaps. *Ecology and Evolution, 15*(8), e71834. https://doi.org/10.1002/ece3.71834

Comisión Europea. (2022). *Harnessing forest genetic resources for increasing options in the face of environmental and societal challenges*. CORDIS. https://cordis.europa.eu/project/id/101081774

Deutscher, S., Braun, V., & Sassen, R. (2026). Shaping the future of biodiversity in our forests: Perspectives on the new EU forest strategy for 2030. *Sustainable Futures, 11*, 101798. https://doi.org/10.1016/j.sftr.2026.101798

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (s. f.). *Forest genetic resources*. Sustainable Forest Management Toolbox.

Ivetić, V., Devetaković, J., Nonić, M., Stanković, D., & Šijačić-Nikolić, M. (2016). Genetic diversity and forest reproductive material – from seed source selection to planting. *iForest – Biogeosciences and Forestry, 9*(5), 801–812. https://doi.org/10.3832/ifor1577-009

Jactel, H., Bauhus, J., Boberg, J., Bonal, D., Castagneyrol, B., Gardiner, B., González-Olabarria, J., Koricheva, J., Meurisse, N., & Brockerhoff, E. (2017). Tree diversity drives forest stand resistance to natural disturbances. *Current Forestry Reports, 3*, 223–243. https://doi.org/10.1007/s40725-017-0064-1

Knutzen, F., Averbeck, P., Barrasso, C., Bouwer, L. M., Gardiner, B., Grünzweig, J. M., Hänel, S., Haustein, K., Johannessen, M. R., Kollet, S., Müller, M. M., Pietikäinen, J.-P., Pietras-Couffignal, K., Pinto, J. G., Rechid, D., Rousi, E., Russo, A., Suarez-Gutierrez, L., Veit, S., Wendler, J., Xoplaki, E., & Gliksman, D. (2025). Impacts on and damage to European forests

from the 2018–2022 heat and drought events. *Natural Hazards and Earth System Sciences, 25*(1), 77–117. https://doi.org/10.5194/nhess-25-77-2025

Konnert, M., Fady, B., Gömöry, D., A'Hara, S., Wolter, F., Ducci, F., Koskela, J., Bozzano, M., Maaten, T., & Kowalczyk, J. (2015). *Use and transfer of forest reproductive material in Europe in the context of climate change*. European Forest Genetic Resources Programme (EUFORGEN), Bioversity International.

Leites, L., & Benito Garzón, M. (2023). Forest tree species adaptation to climate across biomes: Building on the legacy of ecological genetics to anticipate responses to climate change. *Global Change Biology, 29*(17), 4711–4730. https://doi.org/10.1111/gcb.16711

Milesi, P., Kastally, C., Dauphin, B., Cervantes, S., Bagnoli, F., Budde, K. B., Cavers, S., Fady, B., Faivre-Rampant, P., González-Martínez, S. C., Grivet, D., Gugerli, F., Jorge, V., Lesur Kupin, I., Ojeda, D. I., Olsson, S., Opgenoorth, L., Pinosio, S., Plomion, C., Rellstab, C., Rogier, O., Scalabrin, S., Scotti, I., Vendramin, G. G., Westergren, M., Lascoux, M., & Pyhäjärvi, T. (2024). Resilience of genetic diversity in forest trees over the Quaternary. *Nature Communications, 15*, 8538. https://doi.org/10.1038/s41467-024-52612-y

Muscat, A., de Olde, E. M., Ripoll-Bosch, R., van Zanten, H. H. E., Metze, T. A. P., Termeer, C. J. A. M., van Ittersum, M. K., & de Boer, I. J. M. (2021). Principles, drivers and opportunities of a circular bioeconomy. *Nature Food, 2*(8), 561–566. https://doi.org/10.1038/s43016-021-00340-7

Olsson, S., Dauphin, B., Jorge, V., Grivet, D., Farsakoglou, A. M., Climent, J., Alizoti, P., Faivre-Rampant, P., Pinosio, S., Milesi, P., Scalabrin, S., Bagnoli, F., Scotti, I., Vendramin, G. G., González-Martínez, S. C., Fady, B., Aravanopoulus, F. A., Bastien, C., & Alía, R. (2023). Diversity and enrichment of breeding material for resilience in European forests. *Forest Ecology and Management, 530*, 120748. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120748

OptFORESTS. (2025). *Forest nurseries in Europe: Priorities to reach the Green Deal goals of tree deployment* (Policy Brief 1). https://www.optforests.eu/fileadmin/Websites/OptForest/Uploads/Documents/OptFORESTS_policy_brief_1_2025.pdf

Ratnam, W., Rajora, O. P., Finkeldey, R., Aravanopoulos, F., Bouvet, J.-M., Vaillancourt, R. E., Kanashiro, M., Fady, B., Tomita, M., & Vinson, C. (2014). Genetic effects of forest management practices: Global synthesis and perspectives. *Forest Ecology and Management, 333*, 52–65. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.06.008

Rogelja, T., Secco, L., Padovezi, A., Pettenella, D., Masiero, M., Pisani, E., Giacomoni, J., Da Re, R., Caiolo, S., Lovrić, M., Farsakoglou, A. M., Bozzano, M., Lefèvre, F., Fady, B., Desgroux, A., González-Martínez, S. C., Ovaska, U., Rusanen, M., Beuker, E., . . . Leonhard, B. (2023). Forest genetic resources and forest reproductive material at the cross-section of multiple policy domains in Europe. En A. Japelj, V. Leban, Š. Pezdevšek Malovrh y L. Zadnik Stirn (Eds.), *Deal for green? Contribution of managerial economics, accounting, and cross-sectoral policy analysis to climate neutrality and forest management* (pp. 48–56). University of Ljubljana,

Biotechnical Faculty y Slovenian Forestry Institute. https://doi.org/10.20315/SilvaSlovenica.0022.18

TRAGSA. (2026). *Estimating phenological and physiological parameters for drought stress in Castanea spp. using data of 3 clonal plots in Spain: Case studies for low-input breeding that safeguards genetic diversity* [Informe técnico interno]. Grupo TRAGSA.

Vizzarri, M. (2024). Managing global forests in view of multiple goals: An evidence-based perspective. *Land, 13*(12), 2169. https://doi.org/10.3390/land13122169

Westergren, M. (2026). *WP3 – Next-generation common garden trials to promote biodiversity and climate change adaptation* [Presentación de PowerPoint]. OptFORESTS, proyecto Horizonte Europa, acuerdo de subvención n.º 101081774.