



9CFE-1628

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**
ISBN: 978-84-941695-7-1

Organiza





¿Cómo pueden la gestión forestal y el mejoramiento genético optimizar los servicios ecosistémicos en el norte de Europa?

VERGARECHEA, M (1). SEVILLANO, I (1). ANTON-FERNANDEZ, C (1).

(1) Departamento de gestión forestal. Norwegian Institute of Bioeconomy Research - NIBIO

Resumen

La gestión forestal debe equilibrar diversos objetivos, especialmente con la estrategia de bioeconomía consolidada como un pilar clave en las estrategias sectoriales a nivel global. Sin embargo, estudios previos revelan que las compensaciones y sinergias entre objetivos varían según políticas y regiones. El cambio climático agrava esta situación, ya que las especies de árboles, con un crecimiento subóptimo, son más vulnerables.

En este contexto, la mejora genética ha demostrado ser eficaz para mitigar los efectos del cambio climático aumentando la resiliencia de las especies forestales. También permite mejorar otras características, como el crecimiento o la calidad de la madera.

Este estudio busca identificar prácticas de manejo forestal que combinen silvicultura y mejora genética para optimizar la contribución de los bosques a uno o más indicadores de Servicios Ecosistémicos Forestales. Para ello, analizamos 9,371 parcelas permanentes del Inventario Forestal de Noruega y realizamos simulaciones a 100 años bajo diferentes prácticas silvícolas y opciones de mejora genética. Luego, optimizamos los escenarios para minimizar los conflictos entre los SEF.

La incorporación de estrategias de mejora genética en los planes de manejo forestal no solo ayudará a satisfacer la demanda futura de madera, sino que también reducirá los conflictos entre su suministro y otros servicios ecosistémicos.

Palabras clave

servicios ecosistémicos, mejora genética, gestión forestal, bosques boreales.

1. Introducción

Los bosques desempeñan un papel fundamental en la mitigación del cambio climático al ofrecer una amplia gama de servicios ecosistémicos, que incluyen la regulación climática (como el almacenamiento de carbono y el ciclo de nutrientes), la provisión de recursos (como madera) y servicios culturales que promueven el bienestar humano (Tischenko et al., 2024). En este contexto, la gestión forestal enfrenta el desafío de equilibrar estos múltiples objetivos, especialmente en un escenario donde las estrategias de bioeconomía han ganado relevancia en las políticas sectoriales a nivel mundial (Blatter et al., 2023, Ceccherini et al., 2020). La creciente demanda de madera para la industria forestal intensifica la presión sobre los ecosistemas y la biodiversidad forestal, generando potenciales conflictos con otros servicios ecosistémicos, como la conservación de la biodiversidad, la regulación de inundaciones y el suministro de agua potable (Primmer et al., 2021). El cambio climático añade otra capa de complejidad, al modificar las tasas de crecimiento de las especies y al aumentar la vulnerabilidad de las poblaciones forestales frente a heladas, sequías, plagas y patógenos (Pretzsch et al., 2023).

Para abordar estas demandas competitivas, se espera que una combinación de mejoras genéticas y estrategias de manejo forestal efectivas desempeñen un papel



clave en reducir la presión sobre los recursos naturales y balancear objetivos contrapuestos (Fugerey-Scarbel et al., 2024). Los programas de mejoramiento genético han tenido un impacto significativo en la creación de plantaciones en todo el mundo, aumentando no solo la cantidad y calidad de los productos forestales, sino también la resiliencia de los bosques frente al cambio climático (Olsson et al., 2023).

Desde la década de 1940, los programas de mejoramiento genético en Escandinavia han estado enfocados en especies de gran relevancia comercial como el abeto (*Picea abies* L.) o el pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.), seleccionando árboles superiores en términos fenotípicos. En Noruega, el abeto es especialmente importante, representando el 73% del volumen de madera comercializada. La mejora genética en este caso no solo busca maximizar el crecimiento en volumen, sino también garantizar una alta calidad del tronco para usos estructurales, como la producción de madera aserrada. Además, en años recientes, las estrategias de mejoramiento genético han evolucionado para enfrentar los desafíos del cambio climático, promoviendo tasas de crecimiento más altas sin comprometer la calidad de la madera, preservando la diversidad genética y mejorando el potencial adaptativo de los bosques (Rosvall and Lundström, 2011, Jansson et al., 2017, Edvardsen et al., 2010, Skråppa and Steffenrem, 2019).

2. Objetivos

El objetivo principal de este estudio es identificar prácticas de manejo forestal que integren material genético mejorado con estrategias silvícolas para maximizar la provisión de servicios ecosistémicos forestales (SEF). Los objetivos específicos son:

1. Cuantificar los beneficios en la provisión de madera y otros servicios ecosistémicos forestales al introducir material genético mejorado en los sistemas de gestión forestal.
2. Identificar las estrategias de mejoramiento genético más efectivas, diferenciando entre aquellas que se enfocan únicamente en el crecimiento y aquellas que combinan crecimiento y calidad de la madera, para maximizar la producción de madera y otros servicios ecosistémicos.

3. Metodología

Los datos utilizados en este estudio provienen del Inventario Forestal Nacional (NFI) de Noruega, realizado entre 2018 y 2022. Este inventario comprende parcelas de 250 m² distribuidas en una cuadrícula de 3 × 3 km en las zonas bajas, 3 × 9 km en áreas montañosas y 9 × 9 km en Finnmark. Los bosques inventariados están dominados principalmente por abeto (*Picea abies*), pino silvestre (*Pinus sylvestris*) y abedul (*Betula pendula* y *B. pubescens*), además de otras especies caducifolias en menor proporción.

Las proyecciones de las dinámicas forestales y el manejo se realizaron mediante el simulador de crecimiento SiTree, que permite modelar las condiciones específicas del sitio, como el crecimiento, la regeneración y la mortalidad, así como la diversidad de prácticas de manejo regionales. Los impactos del cambio climático se incorporaron utilizando un modelo empírico sensible al clima que incluye variables clave, como la suma de temperaturas durante la temporada de crecimiento y el excedente de humedad en junio. Las proyecciones climáticas siguieron el escenario de emisiones RCP 4.5, ajustadas a escala de 1 × 1 km.

Las suposiciones sobre el uso de material genéticamente mejorado de abeto (*Picea abies*) y pino silvestre (*Pinus sylvestris*), así como las ganancias en altura obtenidas respecto al material no mejorado, se resumen en la Tabla 1, organizadas por zonas de mejoramiento. Estas estimaciones de ganancia genética, derivadas de datos de huertos semilleros maduros, se incorporaron en SiTree multiplicando el índice de sitio (SI) por la ganancia esperada en el crecimiento en altura.

En la Tabla 1, la proporción del área plantada con material mejorado se expresa como un porcentaje del total plantado. Por ejemplo, se estima que el 95 % del área plantada con abeto en el este de Noruega, a altitudes inferiores a 350 m, utiliza material mejorado. Entre 2018 y 2022, aproximadamente el 77 % del área de abeto cosechada se regeneró mediante plantación, mientras que en el caso del pino, un promedio del 10 % del área cosechada fue plantada, debido a la alta proporción de regeneración natural en esta especie (Resultatkartleggingen, datos no publicados).

Para simular estas proporciones, primero se seleccionaron las áreas consideradas plantadas y, dentro de estas, las áreas con material genéticamente mejorado. Las áreas se seleccionaron aleatoriamente hasta alcanzar los porcentajes establecidos, priorizando las de mayor calidad ($SI > 8$), ya que las áreas de menor calidad tienen mayor probabilidad de regenerarse naturalmente o ser plantadas sin material mejorado.

Tabla 1. Suposiciones sobre el uso y las ganancias en altura del material genéticamente mejorado de abeto (Picea abies) y pino silvestre (Pinus sylvestris), agrupadas por zonas de mejoramiento (F y G). Los valores fuera de los paréntesis indican la proporción del área plantada con material genéticamente mejorado, basada en la disponibilidad de semillas, expresada como un porcentaje del área total plantada. Las ganancias en crecimiento en altura, presentadas entre paréntesis, se derivan de datos de ensayos de progenie realizados por la Fundación Noruega de Semillas Forestales (Skogfrøverket) y de publicaciones internacionales de Finlandia y Suecia.

Zonas de mejora genética	Primeros 10 años		Después 10 años	
	Abeto	Pino	Abeto	Pino
Zona Este de Noruega < 350 m (F1, G1)	95% [8%]	95% [6%]	95% [10%]	95% [8%]
Zona Este de Noruega 350 - 650 m (F2, G2)	95% [8%]	95% [6%]	95% [10%]	95% [8%]
Zona Este de Noruega > 650 m (F3, G3)	95% [8%]	65% [6%]	95% [10%]	65% [8%]
Zona Oeste de Noruega < 350 m (F4, G4)	100% [8%]	25% [6%]	100% [10%]	25% [8%]
Trøndelag/ Helgeland < 250m (F5, G5)	90% [8%]	50% [6%]	90% [10%]	50% [8%]
Trøndelag/ Helgeland 250 - 450 m (F6, G6)	25% [8%]	50% [6%]	25% [10%]	50% [8%]
Nordland norte y Troms/Finnmark < 250m (F7, G7)	25% [8%]	25% [6%]	25% [10%]	25% [8%]

Se definieron siete regímenes de gestión forestal, los cuales representan diferentes niveles de intensidad de corta, tiempos de rotación, número de aclareos y tipo de regeneración. Cuatro de los regímenes de gestión se basaron en modificaciones del régimen de más común en Noruega, el régimen extensivo uniforme (Extensivo,

Extensivo-largo, Intensivo e Intensivo-corto). También incluimos el régimen Multiespecie, enfocado en promover la mezcla de especies en el rodal, y el régimen de cobertura continua (CCF), enfocado en diversificar la estructura forestal y conseguir una cobertura continua del dosel superior. Finalmente, incluimos un régimen sin actividad de gestión forestal (Tabla 2).

Además de los regímenes de gestión estándar, algunos de estos regímenes también se aplicaron incorporando ganancias genéticas. Específicamente, estos escenarios de gestión mejorada se centraron en el uso de abeto y pino silvestre como especies principales. Por ejemplo, en un escenario implementamos tanto el régimen tradicional extensivo como una versión modificada que incluye ganancias genéticas, denominada *extensivo_gen*, como se describió anteriormente. Los regímenes con sus versiones correspondientes que incorporan ganancias genéticas se presentan en la Tabla 1. Estas modificaciones nos permiten explorar cómo el potencial genético mejorado, a través del uso de semillas de mayor calidad, podría influir en la dinámica forestal bajo diferentes intensidades y enfoques de gestión.

- Simulación de escenarios con mejora genética

Establecimos tres escenarios diferentes basados en cómo se aplicó la mejora genética dentro de la simulación, cada uno reflejando la combinación óptima de prácticas de gestión para mejorar la cantidad y calidad de la madera, promover la biodiversidad y contribuir a la mitigación del cambio climático.

(a) Escenario tradicional (Sin mejora genética): Este escenario utiliza las estrategias de gestión actuales y ampliamente implementadas, sirviendo como base para la comparación. En consecuencia, las mejoras genéticas descritas en la Tabla 2 no se aplicaron a ninguna de las especies forestales en este escenario.

(b) Escenario enfocado en el crecimiento: En este escenario, introducimos nuevas estrategias de gestión centradas en maximizar el crecimiento de los árboles, lo que incrementa la producción de madera y el rendimiento general del bosque, con énfasis en la cantidad. Las mejoras genéticas se aplicaron según las suposiciones para el uso y las mejoras en el crecimiento en altura del abeto y el pino silvestre que se muestran en la Tabla 1.

(c) Escenario enfocado en la calidad: Este escenario prioriza la implementación de regímenes de gestión que mejoren la calidad de la madera, atendiendo potencialmente a mercados de madera de alto valor y a una mayor duración del almacenamiento de carbono en los productos de madera. En este escenario, las mejoras genéticas se aplicaron de manera similar al enfoque enfocado en el crecimiento, con las mismas suposiciones para el uso y las mejoras en altura del abeto y el pino silvestre. Sin embargo, se introdujo un paso adicional para mejorar aún más la calidad de la madera. Específicamente, durante el proceso de las simulaciones la proporción de madera asignada a la producción de troncos para aserrar—utilizada para madera de alta calidad—se incrementó del 55% al 65% del volumen del tronco.

Tabla 2. Regímenes de gestión aplicados durante la simulación en SITREE

Régimen de gestión	Descripción	Versión con mejora genética
Extensivo	gestión extensiva uniforme (plantación, corta final)	Si
Extensivo-largo	gestión extensiva uniforme (plantación, corta final). Se aumenta el periodo de rotación al 140% de la edad de rotación.	Si
Intensivo	Gestión intensivo uniforme (plantación,	Si

	mayor densidad, fertilizaciones, clareos)	
Intensivo-corto	Gestión intensivo uniforme (plantación, mayor densidad, fertilizaciones, clareos). Se disminuye el periodo de rotación al 80% de la edad de rotación.	Si
Multiespecie	Gestión de múltiples especies de edad uniforme (renovación con una mezcla de especies de abeto/pino/abedul)	No
Cobertura continua	Silvicultura de cobertura continua (cada 15 años se extrae el crecimiento de 15 años)	No
Sin gestión	Silvicultura con objetivo protector	No

- Servicios Ecosistémicos

A partir de los resultados de las simulaciones, para cada escenario, estimamos la provisión de diferentes servicios ecosistémicos (SE): (i) producción de madera; (ii) bioenergía; (iii) conservación de la biodiversidad; y (iv) regulación climática. Dada la complejidad asociada con la evaluación de estos servicios, utilizamos diferentes indicadores para realizar las estimaciones. Estos indicadores fueron los mismos para cada escenario simulado

La **producción de madera** (i), considerada el recurso más relevante, se midió como la cantidad total de madera comercial extraída. La **producción de bioenergía** (ii) se calculó a partir de los residuos de tocones y ramas. La **biodiversidad** (iii) se evaluó mediante varias métricas estructurales, incluyendo el área clasificada como "área MIS" (que refleja la abundancia de árboles viejos y grandes) y el volumen de madera muerta (m³). La **regulación climática** (iv) se midió calculando el carbono almacenado en la biomasa viva, la madera muerta y el suelo. El carbono fijado en los bosques se estimó mediante ecuaciones de biomasa de árboles individuales, aplicando un factor de conversión de 0.5 para transformar biomasa en carbono. Adicionalmente, calculamos el carbono almacenado en productos madereros, diferenciando entre madera aserrada y paneles, con vidas medias de 35 y 25 años, respectivamente.

La demanda de madera y biomasa en Noruega se modeló utilizando una versión del modelo económico GLOBIOM que integra sectores como la silvicultura, la agricultura, el ganado y la bioenergía. Este modelo detalla específicamente los sectores forestal, industrial y de bioenergía forestal, utilizando datos espaciales de crecimiento forestal y costos asociados al transporte y cambios en el uso de la tierra. Basándose en datos del Inventario Forestal Nacional (NFI), GLOBIOM clasifica los bosques europeos en primarios, secundarios y gestionados, además de diversas categorías de gestión (sin gestión, baja intensidad, multifuncional y alta intensidad). Para este estudio, se empleó un escenario de Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) que proyecta la demanda futura de madera en los sectores de energía, transporte y construcción bajo metas de mitigación climática. Estas proyecciones consideran las tendencias socioeconómicas globales del escenario SSP2, y especifican demandas de cosecha para diversos productos madereros, como trozas, madera para pulpa, leña y residuos, alineándolas con un simulador forestal para optimización multiobjetivo.

- Inclusión de los indicadores en el escenario de optimización

Nuestro escenario busca aumentar el valor de la industria forestal y de la madera mediante el incremento de la producción y extracción sostenible de materias primas, junto con la producción rentable de bioenergía y biocombustibles. Por lo tanto, se establecieron dos objetivos clave para maximizar: los indicadores relacionados con la madera (valor neto de la cosecha) y con la bioenergía (residuos de la cosecha, como ramas y copas). Este último solo se consideró disponible en el

mercado si la rentabilidad de la producción de bioenergía (basada en los costos de extracción hasta el borde del camino) se mantenía por debajo de 150 NOK.

Además, el escenario estableció objetivos de conservación de la biodiversidad, los cuales se trataron como restricciones para evitar cualquier reducción respecto a los niveles actuales. También se fijaron metas ambiciosas para transformar a Noruega en una sociedad de bajas emisiones mientras se promueve el uso de madera en la construcción. Como resultado, se abordó la regulación climática tanto como un objetivo a maximizar como una restricción, asegurando que las emisiones no aumenten más allá del nivel actual. Asimismo, el escenario incluyó metas para maximizar la captura de carbono en los bosques, destacando el papel de estos como sumideros de carbono.

Dentro de cada escenario se priorizo el cumplimiento de las demandas de madera y biomasa (GLOBIOM). Una vez alcanzadas estas demandas, se procedió a optimizar el resto de los objetivos establecidos en el párrafo anterior. Este enfoque asegura que la disponibilidad la madera y biomasa sea satisfecha antes de implementar estrategias adicionales para alcanzar metas complementarias.

4. Resultados

Se incluyó mejora genética en el 38.7 % de las parcelas de inventario. Como se ilustra en la Figura 1, la distribución de parcelas con material genéticamente mejorado en Noruega es amplia y generalizada.

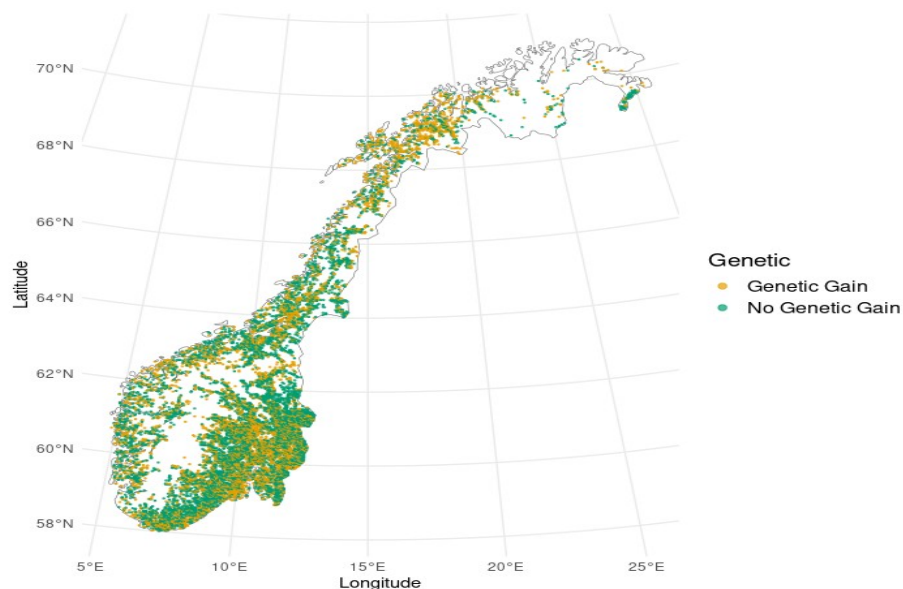


Figura 1. Distribución de parcelas con y sin mejora genética en Noruega.

Noruega tiene la capacidad de satisfacer las demandas de biomasa para madera y bioenergía modeladas por GLOBIOM en todos los escenarios (Fig. S1, material suplementario), aunque los enfoques para alcanzar estas demandas varían significativamente entre escenarios (Fig. 2). La producción de troncos para aserrío muestra una tendencia ascendente constante en todos los escenarios, con volúmenes notablemente mayores en aquellos que incorporan mejoras genéticas. En contraste, la producción de pulpa presenta fluctuaciones marcadas, con picos y descensos en puntos temporales específicos. Estas variaciones están estrechamente

vinculadas a los cambios en los patrones de producción de troncos para aserrío; por ejemplo, una disminución en la producción de troncos para aserrío genera un aumento significativo en la producción de pulpa, y viceversa (e.g., en el año 2063). La producción de residuos también sigue una tendencia general ascendente a largo plazo, particularmente en los escenarios que incluyen mejoras genéticas.

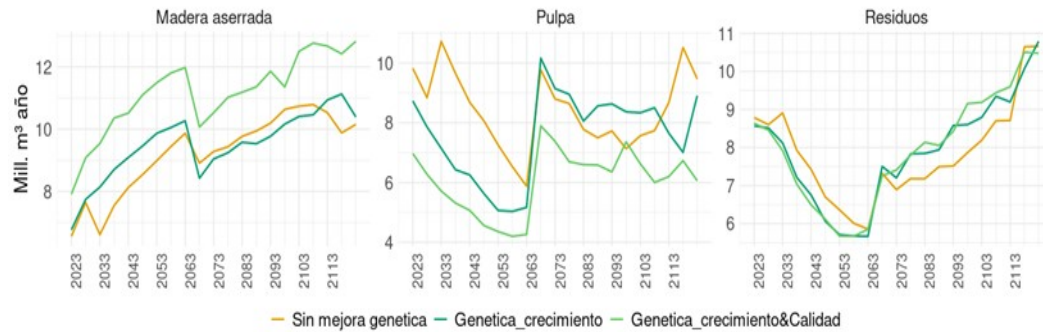


Figura 2. Suministro diferentes tipos de productos, incluidos troncos para aserrío, pulpa y residuos, bajo los tres escenarios de gestión óptima.

Los resultados muestran que las alternativas sin gestión y extensivo son los regímenes de gestión con mayor proporción en todos los escenarios (Tabla 3). En particular, la proporción de SG aumentó significativamente con la introducción de mejora genética, pasando del 23,2% en el escenario Sin Mejora Genética al 31,1% en el escenario de Crecimiento y Calidad Genética. La clase de régimen extensivo (BAU), que representa el enfoque de gestión tradicional en Noruega, fue la gestión óptima para el 26,8% del área bajo el escenario Sin Mejora Genética. Sin embargo, esta proporción disminuyó en los otros dos escenarios, incluso considerando el área combinada de BAU con mejora genética (BAU_gen) y sin mejora genética (BAU). Además, los regímenes mejorados genéticamente desempeñan un papel cada vez más importante en los dos últimos escenarios, ya que los regímenes "gen", como EBAU_gen y MULT_gen, se vuelven más destacados en los escenarios de Crecimiento Genético y Crecimiento y Calidad Genética. Estos escenarios promueven una distribución más equilibrada de los regímenes, reflejando una mayor diversidad en las estrategias de gestión.

Tabla 3. Proporción de implementación de los regímenes de gestión en la solución óptima bajo tres escenarios: sin material genético mejorado, con mejoras genéticas orientadas al crecimiento y con mejoras genéticas enfocadas tanto en el crecimiento como en la calidad de la madera.

Gestion	Sin material genetico	Genético_crecimiento	Genético_crecimiento y calidad
EXT	26.8	7.6	5.2
EXT_gen		14.1	14.7
EXTL	23.2	9.1	6.7
EXTL_gen		14.5	14
INT	12.4	4.4	3.8
INT_gen		7.3	7.2
INTC	9.4	3.9	3.8
INTC_gen		6.2	6.7

SG	23.2	28.3	31.1
MULT	4.9	1.5	1.4
MULT_gen		2.5	2.8
CCF	0.2	0.7	2.7

La Figura 3 muestra los cambios temporales en los indicadores de Servicios Ecosistémicos Forestales (SEF) durante el periodo simulado en los tres escenarios genéticos. Los resultados revelaron que el escenario de Crecimiento y Calidad Genética alcanzó consistentemente los valores más altos en la mayoría de los indicadores SEF, mientras que el escenario Sin Mejora Genética mostró valores significativamente más bajos para la mayoría de estos indicadores, excepto en el almacenamiento de carbono en productos de madera cosechada (HWP), donde registró los valores más altos. En general, los tres escenarios presentaron un aumento en la mayoría de los indicadores en comparación con el periodo inicial. Cabe destacar que las diferencias entre escenarios se hicieron particularmente pronunciadas hacia el final de la simulación en indicadores como el valor neto de la cosecha, el área de MiS y el área de bosques con árboles viejos, donde el escenario de Crecimiento y Calidad Genética proyectó los valores anuales más altos. El almacenamiento de carbono en productos de madera cosechada mostró un aumento significativo en los periodos iniciales, alcanzando un pico de 62 millones de kt de CO₂ en 2043 bajo el escenario Sin Mejora Genética. Posteriormente, experimentó un descenso, llegando a aproximadamente 40 millones de kt de CO₂ al final de la simulación. En general, las tendencias fueron similares en los tres escenarios, con el escenario Sin Mejora Genética mostrando valores más altos durante la primera mitad de la simulación y más bajos hacia el final. El flujo de sumidero de carbono en el bosque mostró una tendencia creciente durante todo el periodo simulado, sin diferencias significativas entre los escenarios.

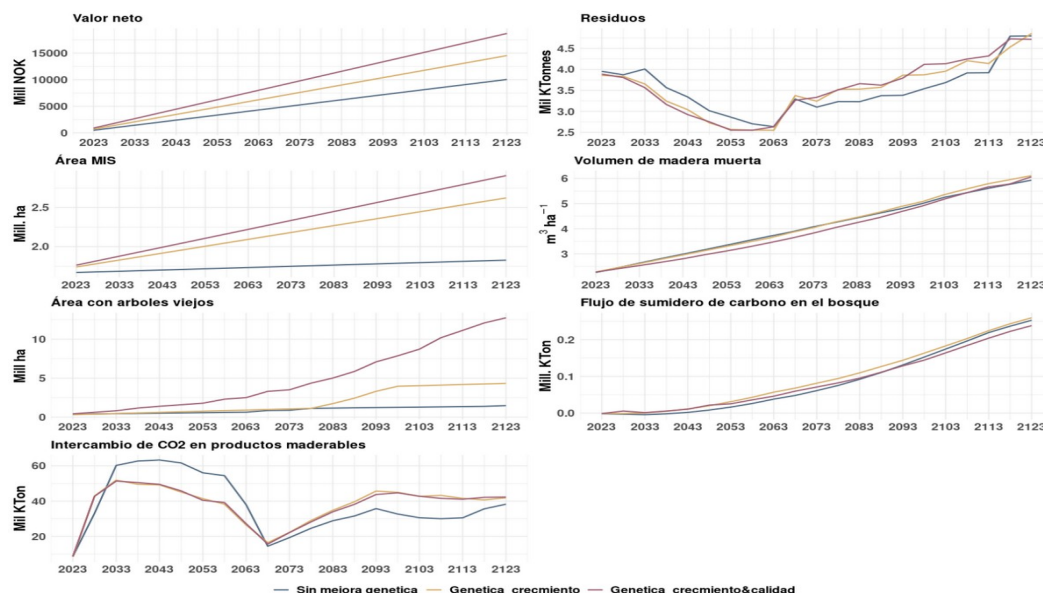


Figura 2. Impacto de la solución óptima en el desarrollo futuro de los indicadores de Servicios Ecosistémicos Forestales (FES). Estos indicadores representan los valores totales para Noruega bajo los diferentes escenarios genéticos. Área MiS = áreas reservadas del "Inventario Complementario de Zonas de Alta Prioridad"

5. Discusión

Estudios previos han demostrado que los bosques de Noruega cuentan con recursos suficientes para satisfacer las demandas de madera y biomasa proyectadas por GLOBIOM, necesarias para alcanzar los objetivos de mitigación climática establecidos por Europa (Vergarechea et al., 2023). Asimismo, estas investigaciones han analizado diversas estrategias para lograrlo (Blatter et al., 2023), considerando cómo estas afectan la provisión de distintos servicios ecosistémicos, así como las sinergias asociadas (Fernández et al., 2022, Toraño Caicoya et al., 2023). Sin embargo, hasta ahora, ningún estudio parece haber explorado el potencial del uso de mejora genética como herramienta para satisfacer estas demandas de madera y biomasa, y para reducir los potenciales conflictos entre los servicios ecosistémicos.

Los resultados de este estudio destacan el significativo potencial de la mejora genética para satisfacer las exigencias de la UE en el cumplimiento de los objetivos de mitigación climática establecidos por GLOBIOM (European, 2018). En este contexto, se observa que la orientación de esta mejora genética puede influir de manera notable en los resultados obtenidos, lo que subraya la importancia de su diseño estratégico.

En particular, aunque el comportamiento de las simulaciones, como el aumento en la producción de madera aserrada, era previsible en el tercer escenario (Genética_crecimiento&calidad), resulta especialmente relevante analizar las diferencias entre los escenarios 1 y 2. Si bien los porcentajes relativos de los diferentes productos se mantienen constantes, la mejora genética genera un ligero incremento en la producción de madera aserrada, a expensas de una reducción significativa en la producción de pulpa, especialmente durante los primeros años de las simulaciones. Este hallazgo adquiere especial relevancia porque, aunque una mayor producción de madera de calidad puede aumentar los beneficios económicos, la disminución en la producción de pulpa podría ocasionar pérdidas sustanciales para la industria maderera, particularmente en sectores altamente dependientes de esta materia prima. Esto pone de manifiesto la necesidad de equilibrar los beneficios asociados a una mayor calidad de madera con los posibles impactos negativos en otros segmentos de la cadena de valor forestal.

Por otro lado, la mejora genética aplicada en Noruega podría desempeñar un papel crucial al aumentar la producción anual de madera y, con ello, aliviar la presión sobre regiones más productivas, como Finlandia y Suecia. Investigaciones previas han indicado que estos países han enfrentado desafíos significativos para movilizar los recursos necesarios, tanto para cumplir con los objetivos de mitigación del cambio climático establecidos por la UE como para satisfacer las crecientes demandas nacionales relacionadas con los servicios ecosistémicos (Blatter et al., 2022, Blatter et al., 2023).

En este sentido, Noruega podría contribuir de manera estratégica a reducir estas tensiones, siempre y cuando los objetivos de mitigación climática se definan en un marco regional o supranacional, en lugar de limitarse exclusivamente a niveles nacionales (Di Fulvio et al., 2024). Esta perspectiva colaborativa no solo favorecería una mayor eficiencia en el uso de los recursos forestales, sino que también garantizaría un enfoque más equilibrado y sostenible para alcanzar las metas climáticas de la UE.



La incorporación de la mejora genética en los escenarios no solo genera un aumento en el área sin gestión, sino que también promueve una distribución más equilibrada de las alternativas de manejo forestal. Por consiguiente, el uso estratégico de la mejora genética, especialmente enfocado en optimizar el crecimiento y la calidad de la madera, podría desempeñar un papel fundamental en el cumplimiento de los objetivos establecidos por la estrategia de biodiversidad, que busca incrementar las áreas protegidas hasta alcanzar el 30% (European Commission, 2020).

No obstante, estudios previos han destacado la relevancia de la interacción entre el manejo forestal y la mejora genética, ya que esta puede variar considerablemente según las condiciones específicas del sitio. Por ejemplo, Ahtikoski et al. (2013) demostraron que, en condiciones de crecimiento desfavorables, como las impuestas por el clima severo del norte de Finlandia, mejorar el rendimiento (proporción de madera aserrada) solo es posible mediante el acortamiento del período de rotación y/o la evitación de medidas silvícolas costosas, independientemente de la ganancia genética.

Por lo tanto, aunque en determinadas áreas se observa una interacción significativa entre el manejo forestal y la mejora genética, favoreciendo tanto el crecimiento como la calidad de la madera, también puede ocurrir que la influencia de uno de estos factores sea limitada en ciertas condiciones. Esto subraya la importancia de evaluar dicha interacción bajo diversos escenarios, considerando tanto la calidad del sitio como las condiciones climáticas específicas.

Finalmente, nuestros resultados muestran que la incorporación de la mejora genética contribuye significativamente a la provisión de ciertos servicios ecosistémicos, como el valor neto y la biodiversidad, al aumentar tanto el área destinada a MiS como la superficie con presencia de árboles viejos. Estos hallazgos superan las proyecciones reportadas por Vergarechea et al. (2023), quienes identificaron un incremento mínimo en el área dedicada a MiS dentro del escenario forestal nacional.

Este avance no solo refuerza la importancia de la mejora genética como herramienta para optimizar la gestión forestal, sino que también representa un resultado prometedor con el potencial de contribuir de manera decisiva al cumplimiento de los objetivos de biodiversidad establecidos en las diversas estrategias forestales. Además, al promover un equilibrio entre la producción y la conservación, este enfoque ofrece una solución sostenible frente a los desafíos actuales de gestión forestal y conservación de ecosistemas.

6. Conclusiones

El impacto del mejoramiento genético de árboles está determinado, en gran medida, por la escala en la que se emplea el material forestal reproductivo mejorado (MFR) en los procesos de regeneración forestal. En Noruega, el uso de este MFR está ampliamente extendido en el caso del abeto. Sin embargo, en el pino, los ensayos genéticos son aún demasiado recientes para realizar estimaciones formales. Por esta razón, las ganancias aplicadas en nuestras simulaciones son conservadoras y se estima que podrían ser significativamente mayores a medida que avance el desarrollo genético. En el futuro, se espera que estas estimaciones se perfeccionen, cuando Noruega cuente con una mayor proporción de semillas mejoradas establecida, lo que permitirá reflejar de manera más precisa el potencial real del mejoramiento genético en la productividad y sostenibilidad



forestal.

Finalmente, la integración de enfoques de optimización con simulaciones que incorporan el mejoramiento genético abre nuevas perspectivas y proporciona conocimientos valiosos sobre las complejas interacciones entre el crecimiento arbóreo, la mejora genética y la gestión sostenible de poblaciones forestales. Este enfoque proporciona una base sólida para diseñar estrategias que capturen de manera precisa los beneficios asociados no solo al crecimiento y la calidad de la madera, sino también a la provisión de servicios ecosistémicos clave, como la biodiversidad, el almacenamiento de carbono y la conservación del suelo.

7. Agradecimientos

Este trabajo se llevó a cabo en el marco del proyecto europeo Assess4EST (NFR 333022). Agradecemos profundamente al proyecto por su apoyo y a nuestros colegas internacionales por enriquecer este estudio con sus valiosas contribuciones, particularmente a través de conversaciones inspiradoras sobre simulaciones, optimizaciones multiobjetivo y el mejoramiento genético de árboles.

Bibliografía

- AHTIKOSKI, A.; SALMINEN, H.; OJANSUU, R.; HYNYNEN, J.; KÄRKKÄINEN, K.; HAAPANEN, M.; 2013. Optimizing stand management involving the effect of genetic gain: preliminary results for Scots pine in Finland. CAN. J. FOR. RES. 43, 299–305.
- BLATTERT, C.; EYVINDSON, K.; HARTIKAINEN, M.; BURGAS, D.; POTTERF, M.; LUKKARINEN, J.; SNÄLL, T.; TORAÑO-CAICOYA, A.; MÖNKKÖNEN, M.; 2022. Sectoral policies cause incoherence in forest management and ecosystem service provisioning. FOR. POLICY ECON. 136, 102689–102689.
- BLATTERT, C.; MÖNKKÖNEN, M.; BURGAS, D.; DI FULVIO, F.; TORAÑO CAICOYA, A.; VERGARECHEA, M.; KLEIN, J.; HARTIKAINEN, M.; ANTÓN-FERNÁNDEZ, C.; ASTRUP, R.; EMMERICH, M.; FORSELL, N.; LUKKARINEN, J.; LUNDSTRÖM, J.; PITZÉN, S.; POSCHENRIEDER, W.; PRIMMER, E.; SNÄLL, T.; EYVINDSON, K.; 2023. Climate targets in European timber-producing countries conflict with goals on forest ecosystem services and biodiversity. COMMUN. EARTH ENVIRON. 4.
- CECCHERINI, G.; DUVEILLER, G.; GRASSI, G.; LEMOINE, G.; AVITABILE, V.; PILLI, R.; CESCATTI, A.; 2020. Abrupt increase in harvested forest area over Europe after 2015. NATURE 583, 72–77.
- DI FULVIO, F.; SNÄLL, T.; LAURI, P.; FORSELL, N.; MÖNKKÖNEN, M.; BURGAS, D.; BLATTERT, C.; EYVINDSON, K.; TORAÑO CAICOYA, A.; VERGARECHEA, M.; ANTÓN-FERNÁNDEZ, C.; KLEIN, J.; ASTRUP, R.; LUKKARINEN, J.; PITZÉN, S.; PRIMMER, E.; 2024. Impact of the EU Biodiversity Strategy for 2030 on the EU Wood-Based Bioeconomy. PREPRINT.
- EDVARDSSEN, O.; STEFFENREM, A.; JOHNSKÅS, O.; JOHNSEN, Ø.; MYKING, T.; KVAALLEN, H.; 2010. Strategi for skogplanteforedling 2010–2040 (høringsutkast). [Strategy for tree breeding 2010–2040 (proposal)]. CENTER S. D. S. T. N. F. S., Hamar (Norway).
- EUROPEAN COMMISSION; 2018. A Clean Planet for all. A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy. BRUSSELS.
- EUROPEAN COMMISSION; 2020. EU Biodiversity Strategy for 2030: Bringing Nature Back Into Our Lives. BRUSSELS, BELGIUM.
- FERNÁNDEZ, C. A.; BLATTERT, C.; BURGAS, D.; EYVINDSON, K.; DI FULVIO, F.; FORSELL, N.; HARTIKAINEN, M.; KLEIN, J.; LUKKARINEN, J.; MÖNKKÖNEN, M.;



PITZÉN, S.; PRIMMER, E.; SNÄLL, T.; TORAÑO-CAICOYA, A.; VERGARECHEA, M.; ØISTAD, K.; 2022. Better forest policies and management for sustainability transformations: How can expectations for forests be met? JYU REP. 1, 1–6.

FUGERAY-SCARBEL, A.; BOUFFIER, L.; LEMARIÉ, S.; SÁNCHEZ, L.; ALIA, R.; BISELLI, C.; BUIITEVELD, J.; CARRA, A.; CATTIVELLI, L.; DOWKIW, A.; FONTES, L.; FRICANO, A.; GION, J.; GRIMA-PETTENATI, J.; HELMERSSON, A.; LARIO, F.; LEAL, L.; MUTKE, S.; NERVO, G.; PERSSON, T.; ROSSO, L.; SMULDERS MARINUS, J.; STEFFENREM, A.; VIETTO, L.; HAAPANEN, M.; 2024. Prospects for evolution in European tree breeding. IFOREST - BIOGEOSCI. FOR. 17, 45–58.

JANSSON, G.; HANSEN, J. K.; HAAPANEN, M.; KVAALLEN, H.; STEFFENREM, A.; 2017. The genetic and economic gains from forest tree breeding programmes in Scandinavia and Finland. SCAND. J. FOR. RES. 32, 273–286.

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.; GONZALEZ-MARTINEZ, S. C.; FADY, B.; ARAVANOPOULOS, F. A.; BASTIEN, C.; ALIA, R.; 2023. Diversity and enrichment of breeding material for resilience in European forests. FOR. ECOL. MANAG. 530, 120748.

PRETZSCH, H.; DEL RÍO, M.; ARCANGELI, C.; BIELAK, K.; DUDZINSKA, M.; FORRESTER, D. I.; KLÄDTKE, J.; KOHNLE, U.; LEDERMANN, T.; MATTHEWS, R.; NAGEL, J.; NAGEL, R.; NINGRE, F.; NORD-LARSEN, T.; BIBER, P.; 2023. Forest growth in Europe shows diverging large regional trends. SCI. REP. 13.

PRIMMER, E.; VARUMO, L.; KRAUSE, T.; ORSI, F.; GENELETTI, D.; BROGAARD, S.; AUKES, E.; CIOLLI, M.; GROSSMANN, C.; HERNÁNDEZ-MORCILLO, M.; KISTER, J.; KLUVÁNKOVÁ, T.; LOFT, L.; MAIER, C.; MEYER, C.; SCHLEYER, C.; SPACEK, M.; MANN, C.; 2021. Mapping Europe's institutional landscape for forest ecosystem service provision, innovations and governance. ECOSYST. SERV. 47, 101225–101225.

ROSVALL, O.; LUNDSTRÖM, A.; 2011. Förädlingseffekter i Sveriges skogar. [Summary: Effects of planting genetically improved seedlings on forest growth and potential harvest in Sweden]. SKOGFORSK (SWEDISH), Uppsala.

SKRØPPA, T.; STEFFENREM, A.; 2019. Genetic variation in phenology and growth among and within Norway spruce populations from two altitudinal transects in Mid-Norway. UNPUBLISHED.

TORAÑO CAICOYA, A.; VERGARECHEA, M.; BLATTERT, C.; KLEIN, J.; EYVINDSON, K.; BURGAS, D.; SNÄLL, T.; MÖNKKÖNEN, M.; ASTRUP, R.; DI FULVIO, F.; FORSELL, N.; HARTIKAINEN, M.; UHL, E.; POSCHENRIEDER, W.; ANTÓN-FERNÁNDEZ, C.; 2023. What drives forest multifunctionality in central and northern Europe? Exploring the interplay of management, climate, and policies. ECOSYST. SERV. 64, 101575.

VERGARECHEA, M.; ASTRUP, R.; FISCHER, C.; ØISTAD, K.; BLATTERT, C.; HARTIKAINEN, M.; EYVINDSON, K.; DI FULVIO, F.; FORSELL, N.; BURGAS, D.; TORAÑO-