



9CFE-1350

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



FORMES: Un sistema de proyección para la planificación forestal multiobjetivo

AQUILUÉ, N. (1)(2), ZALDO-AUBANELL, Q. (1), SALGADO, J. (1), CAPIZZI, G. (1), CAMPS, J. (1), MORENO, J. (1), PUKKALA, T. (1)(3), y TRASOBARES, A. (1)

(1) Centre de Ciència y Tecnologia Forestal de Catalunya (CTFC)

(2) Joint Research Unit CTFC – AGROTECNIO

(3) University of Eastern Finland (UEF)

Resumen

El sistema de proyección FORMES para la planificación forestal multiobjetivo está diseñado para comprender y explorar los efectos a medio y largo plazo de diferentes enfoques de gestión forestal, perturbaciones naturales y clima en la dinámica del bosque y en varios servicios ecosistémicos (SE) asociados. Incluye dos módulos para la segmentación e imputación forestal en base a datos LiDAR y de inventarios forestales para rodalizar las masas forestales y asignarles una distribución de clases diamétricas por especie, respectivamente. La dinámica forestal se basa en 82 modelos de árboles individuales sensibles al clima con el fin de simular el crecimiento en diámetro y en altura, la supervivencia y la tanto local como por vecindad. Cuenta con un módulo de estimación de SE como el agua azul, el balance de carbono o el nivel de combustibles. FORMES cuenta, además, con un módulo de optimización espacial multiatributo y de visualización en 3D para la planificación de paisajes resilientes. Se ha aplicado para co-diseñar con técnicos de la administración y del territorio cuatro paisajes agroforestales piloto (centrados en la conservación, producción agroganadera y resistentes a los incendios) en el despliegue del plan de acción de la Estrategia de la Bioeconomía de Cataluña 2030.

Palabras clave

modelo de dinámica forestal, optimización espacial, servicios ecosistémicos, paisaje resiliente, Estrategia de la Bioeconomía de Cataluña 2030

1. Introducción

En un contexto global marcado por el cambio climático, el aumento de perturbaciones naturales, las crecientes demandas sobre los recursos naturales y los crecientes desafíos ambientales y sociales, una planificación sostenible del paisaje agroforestal debe abordar múltiples objetivos que equilibren la conservación, la productividad y la resiliencia de los ecosistemas a múltiples agentes de cambio (CHANG, 2021). Los bosques, como proveedores clave de servicios ecosistémicos, desempeñan un papel esencial en la mitigación del cambio climático, el abastecimiento de recursos y la protección de la biodiversidad (MÜLLER & TURNER, 2017). En un contexto Mediterráneo, los paisajes agroforestales, donde los bosques confluyen con otras cubiertas y usos del suelo, desempeñan un papel fundamental en la provisión de múltiples servicios ecosistémicos. Además, contribuyen a la reducción del riesgo de incendio, la conservación de la biodiversidad o la soberanía alimentaria de un territorio. Sin



embargo, las perturbaciones naturales, el cambio climático y las presiones antrópicas complican la gestión sostenible de estos sistemas complejos (SEARLE & VELDMAN, 2020).

En dicho contexto, la planificación multiobjetivo se presenta como una herramienta clave para diseñar estrategias de gestión que aseguren la resiliencia de los paisajes forestales o agroforestales (PUKKALA 2016; BARTON & PETERSON 2017). Esto requiere incorporar información detallada sobre las dinámicas del bosque, evaluar el impacto de distintas intervenciones y facilitar procesos de toma de decisiones participativos y basados en evidencias científicas (KANGAS et al., 2015). Así, la planificación forestal multiobjetivo se presenta como un enfoque estratégico que busca equilibrar las múltiples funciones y servicios que ofrecen los paisajes y ecosistemas forestales (BLATTERT et al., 2017). Este enfoque considera objetivos diversos, como la conservación de la biodiversidad, la mitigación del cambio climático, la provisión de recursos renovables, la regulación hídrica y la recreación, entre otros. En lugar de priorizar un solo uso del suelo, la planificación multiobjetivo integra diferentes perspectivas y necesidades, permitiendo la coexistencia de metas ambientales, sociales y económicas en un marco sostenible. Además, dicha planificación multiobjetivo debe contar con la participación explícita de la comunidad científica, gestores, técnicos del territorio y propietarios para que el resultado sea validado, aceptado y factible de implementar (REED, 2008).

Para responder a estas necesidades, se han desarrollado herramientas avanzadas de modelización y planificación que permiten integrar información de distintas fuentes, simular dinámicas forestales a medio y largo plazo, y evaluar las implicaciones de diferentes estrategias de gestión forestal en la provisión de servicios ecosistémicos (ARULDOSS et al, 2013). Una de estas herramientas es el sistema de proyección FORMES. Este ha sido diseñado específicamente para planificar paisajes agroforestales resilientes y sostenibles en el ámbito del Mediterráneo, mediante un enfoque multiobjetivo. Dicha aproximación incorpora la priorización acordada de premisas globales de resiliencia, así como también las perspectivas, voluntades, o restricciones de los gestores del territorio con criterio técnico contrastado para elaborar propuestas en formato cartográfico.

En esta línea, FORMES combina metodologías y datos avanzados, como LiDAR e inventarios forestales con tal de segmentar o delimitar los rodales en unidades homogéneas en cuanto a estructura y composición, caracterizar el estado actual de las masas forestales (PUKKALA et al., 2024), con modelos de dinámica y gestión forestal a escala de árbol individual sensibles al clima (TRASOBARES et al., 2022), modelos para la estimación de servicios ecosistémicos forestales clave como la capacidad de absorción de carbono de las masas forestales (RUÍZ-PEINADO et al., 2011; RUÍZ-PEINADO et al., 2012) o la provisión el agua azul (DÉ CÁCERES et al., 2015), y módulos de optimización espacial multiatributo (ÁLVAREZ-MIRANDA et al., 2020) y visualización 3D. El módulo de optimización tiene como misión producir la solución (es decir, una propuesta de planificación a escala de paisaje a medio plazo) que maximice los objetivos globales según su priorización previa y respete las priorizaciones espaciales indicadas por los agentes del territorio y



gestores. El módulo de visualización y transferencia de resultados permite, por un lado, mostrar la evolución de las masas forestales bajo diferentes escenarios de gestión forestal usando gráficos 3D del paisaje y de los árboles, y, por otro lado, comparar cartográficamente la provisión actual y futura de múltiples servicios ecosistémicos.

2. Objetivos

Los objetivos del presente estudio son, por un lado, presentar los elementos que constituyen el sistema para la planificación forestal multiobjetivo FORMES (Figura 1), y, por otro lado, mostrar su aplicabilidad en el co-diseño de paisajes agroforestales resilientes en un contexto de cambio climático dentro del marco de aplicación de uno de los objetivos estratégicos de Estrategia de la Bioeconomía de Cataluña 2030 (<https://mediambient.gencat.cat/es/detalls/Noticies/estrategia-bioeconomia-2030>).

Así, en este artículo, se presenta la aplicación práctica de FORMES en cuatro paisajes agroforestales piloto, abordando cómo esta herramienta puede facilitar el co-diseño participativo con técnicos y gestores del territorio, promoviendo paisajes más sostenibles y resilientes.

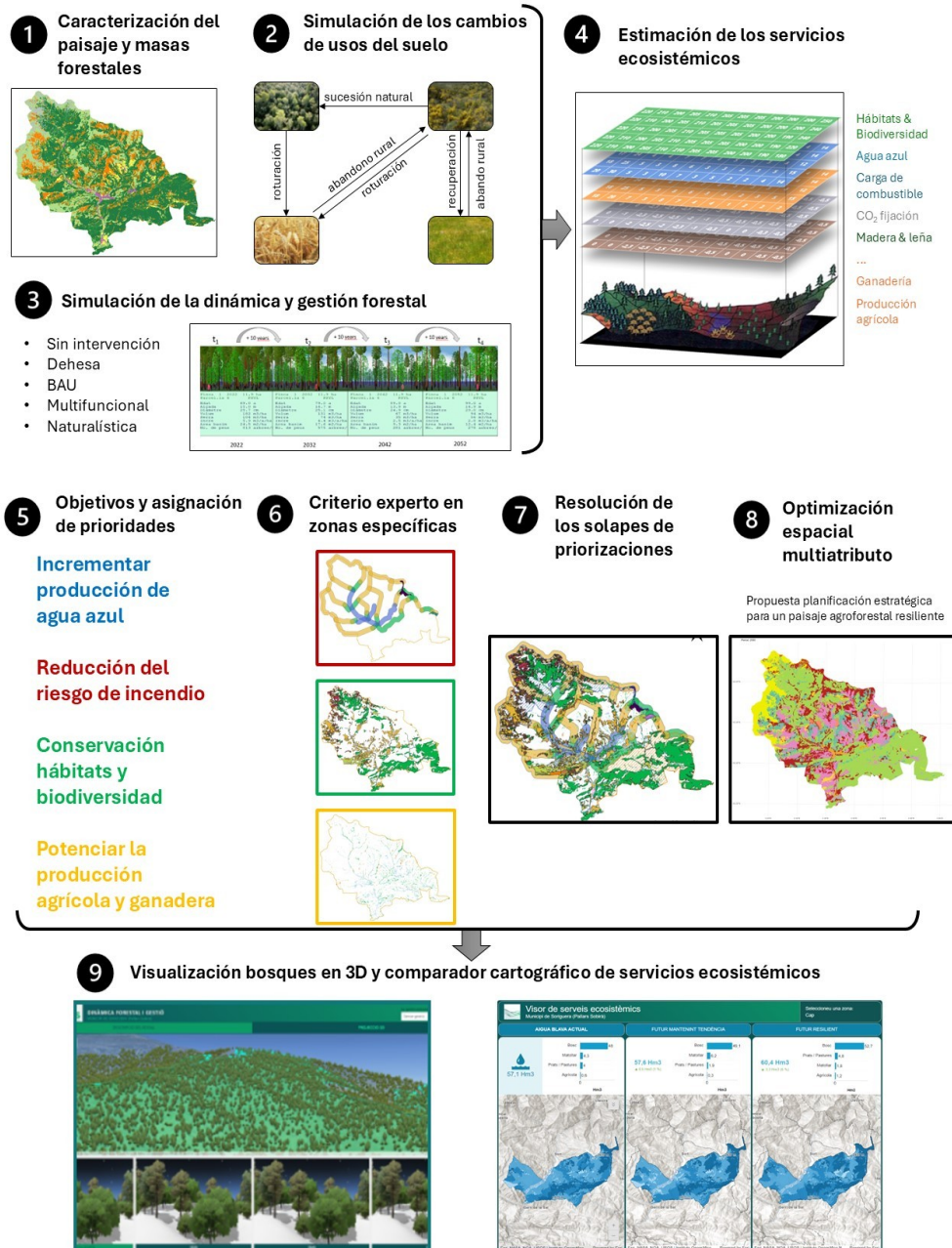


Figura 1. Flujo de trabajo para el co-diseño de paisajes agroforestales utilizando el sistema de proyección multiobjetivo FORMES.

3. Metodología

Con el objetivo de proponer una planificación territorial que promueva paisajes agroforestales resilientes y la provisión sostenible de servicios ecosistémicos en el contexto de la bioeconomía circular catalana, al mismo tiempo que se pone especial énfasis en la importancia de los datos, los modelos, la participación de las comunidades locales y las herramientas de soporte a toma de decisiones, se proponen las siguientes etapas:

1. Caracterización del estado actual de la distribución de las coberturas del suelo y descripción de la composición y estructura de los rodales forestales.
2. Participación de los agentes del territorio para la priorización de los



- objetivos e integrar el criterio técnico en los planes estratégicos
3. Modelización de la dinámica y gestión forestal según diferentes prescripciones silvícolas y procesos de cambio de uso del suelo
 4. Estimación de múltiples servicios ecosistémicos según las prescripciones en cada rodal
 5. Optimización espacial multiatributo
 6. Visualización de la evolución de las masas forestales según diferentes alternativas de gestión forestal y comparativa de la provisión de servicios ecosistémicos

Todas ellas están contempladas e integradas en el sistema de planificación foresta multiobjetivo FORMES (Figura 1) y se describen en las secciones a continuación.

3.1. Área de estudio

Las cuatro áreas piloto seleccionadas como parte del despliegue del plan de acción de la Estrategia de la Bioeconomía de Cataluña 2030 tienen características diferenciales en cuanto a su superficie total, superficie arbolada, las figuras de protección existentes, así como en cuanto al régimen de propiedad de la tierra (Tabla 1) y están ubicadas de norte a sur, y de este a oeste, a lo largo del territorio catalán (Figura 2).

Tabla 1. Características de las cuatro áreas piloto para el co-diseño de paisajes agroforestales resilientes.

9º CONGRESO
FORESTAL ESPAÑOL
2025 | 16-20
GIJÓN | JUNIO

Sori gue ra	Ter res de l'Ebre	Vall de Camp rodon	Vall de Carme																			
			Municipios																			
			Área total																			
			Área forestal																			
			Dist ribu ción de las cubi erta s del suel o	Bos que 72 %	Mat orra l 15 %	Cult ivo 2 %	Pra do 10 %	Otra s 1 %	Bos que 38 %	Mat orra l 36 %	Cult ivo 16 %	Pra do 3 %	Otra s 7 %	Bos que 62%	Mat orra l 12 %	Cult ivo 2 %	Pra do 15 %	Otra s 9 %	Bos que 54 %	Mat orra l 13 %	Cult ivo 25 %	Pra do 3 %
Esp ecie s fore stal es dom ina ntes	Pin us syl vestri s, Pin us uncin ata, Que rcus ilex	Pin us nigra, Pin us syl vestri s, Que rcus ilex	Pin us uncin ata, Que rcus petraea, Fag us sylv atica	Pinus halepensis, Quercus spp., Pinus nigra																		
Fig uras de pro tec ción	Parc Nat ural dels Ports (87 %)	Espai Natural Protegit Sistema Prelitoral Central (24%), Espai d'Interés Natural de les Capçaleres del Foix (1%)																				
Pro pied ad fore stal	Generalitat de Catalunya (1%), Privada (99%)																					

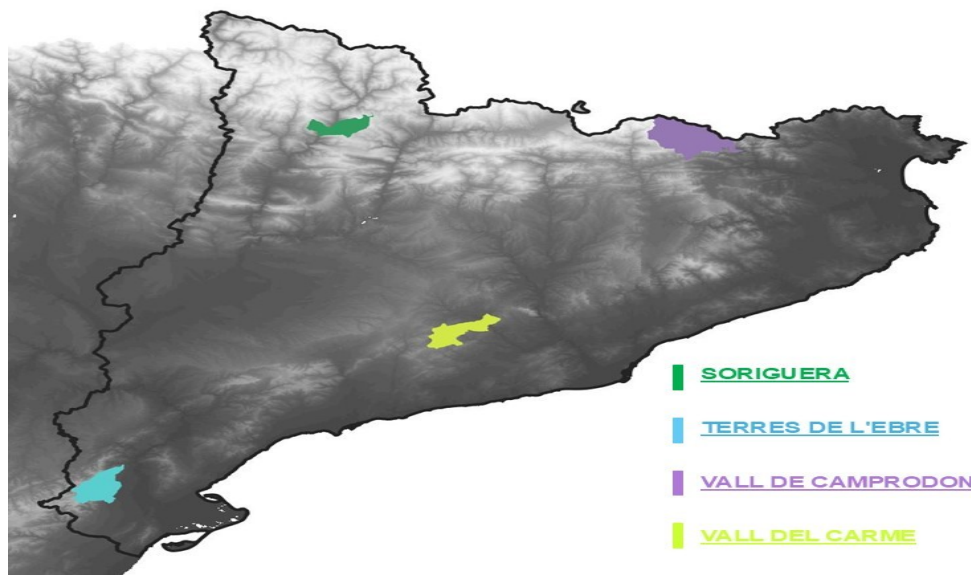


Figura 2. Localización de las cuatro áreas piloto para la co-creación de paisajes agroforestales en el marco de la aplicación de la Estrategia de la Bioeconomía de Cataluña 2030.

3.2. Caracterización del paisaje y las masas forestales

Para caracterizar los cuatro paisajes agroforestales de forma estandarizada se ha utilizado el Mapa de Cubiertas del Suelo de Cataluña 2022 (MCSC20222), agregando las 41 categorías del nivel 2 de la leyenda en 7 tipologías de cubiertas principales: bosque, matorral, cultivo, prado/pastizal, agua, suelo no productivo y zonas artificiales (Tabla 1). Las cubiertas del suelo del MCSC20222 corresponden a la actualización de la cartografía anterior (2018) efectuada por fotointerpretación de las ortofotos más recientes disponibles en cada momento para cada área de trabajo e integrando la información de cartografía complementaria como el SIGPAC de 2023, el Mapa de Hábitats de Cataluña, el Canopy Height Model y las Superficies afectadas por incendios forestales. Complementariamente, los polígonos de las zonas naturales (bosque, matorral y prado/pastizal) se han dividido y enriquecido en base al Mapa de Hábitats Terrestres de Cataluña 1:25.000 (la versión más actual de dicha cartografía) y en las áreas protegidas que disponen de tal cartografía a 1:10.000 se ha priorizado esta última.

Con el fin de caracterizar la composición y estructura de las masas forestales, se ha realizado un proceso de imputación forestal en base al algoritmo *k-Nearest Neighbors* y siguiendo el trabajo de PUKKALA et al., (2024). La imputación forestal tiene como objetivo obtener la distribución de clases diamétricas por especie para cada rodal forestal dentro de un área de estudio, y de ella derivar las variables forestales que puedan precisarse. El proceso de imputación empieza por definir una métrica de similitud forestal que combina datos ambientales y forestales, incluyendo métricas derivadas del LiDAR, datos topográficos y coordenadas geográficas, para cuantificar cuan similares son dos localizaciones con dichos datos informados (Figura 3). Mediante un algoritmo de optimización heurística (*simulated annealing*), se escogen las variables más idóneas, así como las

transformaciones matemáticas (logaritmo, raíz cuadrada, potencia de 2) y los pesos (0.1, 0.5, 1, 1.5, 2) para cada una de ellas, para construir la métrica de similitud óptima. Se han empleado las parcelas del IFN4 y los datos LiDARCAT2 (distribuidos en una cuadrícula de 20 m) por ser coetáneos en el tiempo (2016-2017).

Una vez establecida la métrica de similitud, se identifican las $k=3$ parcelas del IFN4 más similares a cada celda ráster de 20 m y sus correspondientes pesos, que reflejan el grado de similitud dentro de los rodales forestales. Esto permite agregar de forma ponderada las distribuciones de clases diamétricas por especie de las parcelas similares, obteniendo así una única distribución compacta para cada celda, que posteriormente se agregan a nivel de rodal (Figura 3). Este proceso, además de proporcionar la distribución de especies dominantes y codominantes, también permite derivar variables biofísicas clave como el área basal, el volumen en pie, la biomasa total y la densidad, facilitando una caracterización precisa de las masas forestales.

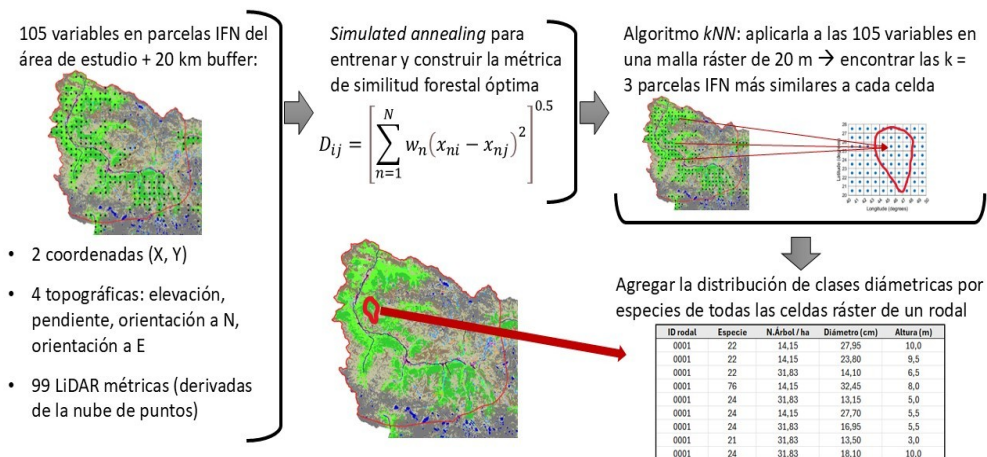


Figura 3. Proceso de imputación forestal aplicado a las áreas de estudio para caracterizar los rodales forestales –ya sean existentes o los derivados del proceso de segmentación automatizada – por su distribución de clases diamétricas por especies.

3.3. Priorización de objetivos y delimitación de zonas prioritarias según criterio técnico

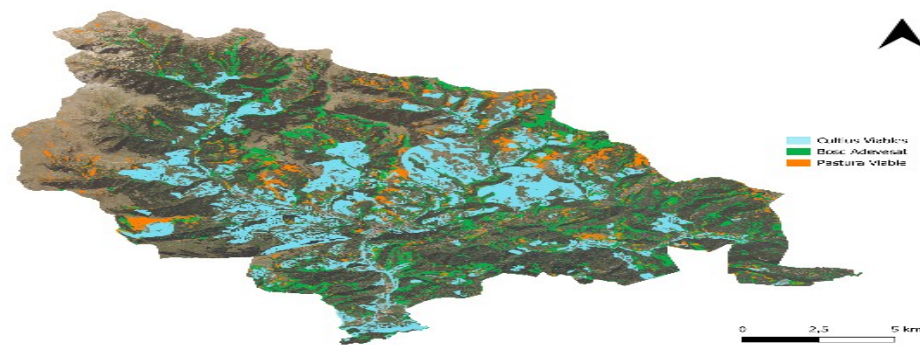
Para las cuatro áreas piloto, se acordaron como premisas u objetivos globales de resiliencia socio-ecológica, con el mismo valor de priorización, la producción de agua azul, la conservación de la biodiversidad y de los hábitats, la reducción del riesgo de incendios forestales y la potenciación de las actividades agrícolas y ganaderas. Aun así, se testaron diferentes combinaciones y ponderación de estos cuatro objetivos con el fin de presentar un abanico de posibles planificaciones estratégicas, todas ellas respondiendo a criterios de resiliencia socio-ecológica.

También se recopiló y generó información georeferenciada en formato vectorial

referente a (1) las áreas estratégicas para la prevención de incendios forestales como lo son los ejes de contención o los puntos estratégicos de gestión definidos por los bomberos de la Generalitat de Catalunya y el servicio de prevención de incendios, (2) las zonas de alto valor ecológico para la conservación de la biodiversidad recogidas en los Hábitats de Interés Comunitario, en las Áreas de Interés Faunístico y Florístico y en cartografía específica proporcionada por los gestores de las diferentes áreas protegidas (Parques Naturales), (3) las zonas naturales en las que se podrían desarrollar actividades agrarias (establecimiento de cultivos) o de pastoreo (establecimiento de pastos permanentes), o zonas arboladas orográficamente adecuadas para transformarse en dehesas (de coníferas en la mayor parte de los casos) y poder albergar actividades silvopastorales, y (4) áreas particulares que técnicos y gestores del territorio delimitaron para promover un determinado uso del suelo o gestión forestal (Figura 4).

A.B.

C.



D.

Figura 4. Áreas específicas para la prevención de incendios forestales (A), la conservación de la biodiversidad (B), la potenciación de las actividades agroganaderas (C) y el resultado de sobreponer todas las priorizaciones específicas según criterio técnico (D) para el área piloto de la Vall de Camprodon.

3.4. Modelización de la dinámica y gestión forestal

El sistema de proyección FORMES para la planificación forestal multiobjetivo es un marco modular de modelización que simula la dinámica forestal bajo condiciones climáticas cambiantes y diferentes estrategias de gestión forestal (TRASOBARES et al., 2022). Los modelos de dinámica forestal han sido diseñados específicamente para comprender y explorar los efectos a medio y largo plazo de enfoques alternativos de gestión forestal, incendios y clima sobre la estructura y composición de los bosques.

El conjunto de modelos empíricos incorporados en FORMES incluye la simulación del incremento en diámetro, incremento en altura, altura total, supervivencia, incorporación local de árboles y colonización desde rodales vecinos por especies potencialmente nuevas. Asimismo, los modelos permiten estimar la incorporación de especies inicialmente ausentes en el rodal objetivo pero presentes en rodales



vecinos, de manera similar a los modelos de dinámica del paisaje (GARCÍA-VALDÉS et al., 2013). Esto es relevante para considerar los procesos de diversificación forestal a lo largo del tiempo. Estos modelos permiten predecir el desarrollo de comunidades arbóreas en España para las especies más abundantes del territorio o en regiones específicas (como el *Pinus canariensis* en las Islas Canarias). Se han considerado 11 entidades específicas, mientras que las especies menos frecuentes se agruparon en 16 grupos según criterios taxonómicos y funcionales, resultando en 27 especies o grupos.

Los 82 modelos empíricos de dinámica forestal incluidos en FORMES son sensibles al clima, basados en árboles individuales e independientes de la distancia. Los modelos a nivel de árbol consideran a los árboles individuales como la unidad básica para simular procesos de crecimiento, mortalidad e incorporación de nuevos árboles. Esto permite una descripción más detallada y flexible de la estructura y composición del rodal, así como la simulación de tratamientos de gestión alternativos en comparación con los modelos a nivel de rodal. Los modelos independientes de la distancia operan asumiendo un patrón espacial promedio de individuos, logrando un rendimiento predictivo similar al de los modelos dependientes de la distancia (que requieren coordenadas espaciales explícitas de los árboles), pero con una menor demanda computacional.

El módulo de gestión forestal incluido en FORMES permite especificar los niveles de producción objetivo de madera (o demanda de madera) para cada especie forestal a escala provincial, nacional o de cualquier unidad de gestión indicada. Incluye una serie de prescripciones silvícolas específicas a nivel de especie, que se aplican a escala de rodal según la especie dominante u otra clasificación de los rodales forestales en diferentes tipologías. Así, aunque los modelos de crecimiento, mortalidad e incorporación de nuevos árboles se hayan desarrollado a nivel de especie (o grupo de especies), es posible personalizar las prescripciones silvícolas para cualquier clasificación de tipologías forestales y capturar con precisión las prácticas de gestión forestal aplicadas a estas tipologías.

En concreto, los tratamientos silvícolas se definen por el tipo de aclareos (mixto, por lo bajo, por lo alto y selectivo – se cortan diferentes proporciones de árboles dependiendo de la clase diamétrica), el área basal mínima para realizar el aclareo (relacionada con la periodicidad del aclareo), el porcentaje de área basal a eliminar durante el aclareo (relacionado con la intensidad del aclareo), el diámetro objetivo o período de rotación en la gestión regular, es decir, el DBH medio del rodal cuando comienza el corte de regeneración, el porcentaje de área basal a eliminar en la corta de regeneración; el período (en años) para las siguientes cortas de regeneración, el porcentaje de mantenimiento de árboles de retención en la corta final y el sistema de regeneración (natural o plantación para el que se indica la especie, DBH y densidad de pies a plantar).

En este ejercicio se han considerado 5 alternativas de gestión silvícola: no intervención, clásica (o *business-as-usual*), multifuncional, naturalística y adehesamiento. Se han parametrizado para las especies principales de cada área piloto y se ha simulado la dinámica forestal durante 30 años (2021 – 2050) para



todos los rodales forestales, para cada una de estas alternativas en pasos temporales de 10 años.

3.5. Estimación de la provisión de servicios ecosistémicos

Se propusieron una serie de servicios ecosistémicos (o indicadores) para caracterizar los ecosistemas y paisajes forestales estando relacionados con los objetivos de resiliencia socioeconómica de interés común para las cuatro áreas piloto (Tabla 2). Los indicadores se calcularon en base a las simulaciones del modelo de dinámica forestal, para cada paso temporal y cada uno de los cinco itinerarios silvícolas planteados. Se adaptó la aproximación del índice de biodiversidad potencial (IBP) para estimar el grado de biodiversidad y riqueza de hábitats que puede albergar una masa forestal (LARRIEU & GONIN, 2008, BAIGES et al. 2019).

Tabla 2. Servicios ecosistémicos estimados a partir de las proyecciones del modelo de dinámica y gestión forestal FORMES, la metodología para calcularlos y a qué cubierta del suelo aplica.

Objetivo	Indicador	Metodología de cálculo	Cubierta del suelo
----------	-----------	------------------------	--------------------

3.6. Optimización multiobjetivo

De forma genérica se establecieron los estados en los que una unidad de paisaje, es decir, un polígono de la cartografía generada para caracterizar las cubiertas del suelo principales (ver sección 3.2) puede encontrarse. Los estados son: bosque NOMAN, bosque BAU, bosque MULTIFUN, bosque NATUR, bosque ADEHE,

matorral, cultivo, prado/pastizal, agua, suelo no productivo y zonas artificiales (Tabla 3). Los cinco primeros estados corresponden solo a las zonas arboladas y hacen referencia al tipo de gestión forestal aplicada (NOMAN – no gestión, BAU – *business-as-usual*, MULTIFUN – multifuncional, NATUR – naturalística y ADEHE – adehesamiento). Igualmente, se establecieron las alternativas de cambio que se podían dar para los polígonos de las áreas piloto. Una alternativa queda definida por la combinación de estado actual y de estado potencial futuro (Tabla 3). A partir de la lista de alternativas, se construyó un espacio de decisión preliminar, esto es, una matriz que especifica para cada polígono todas las alternativas posibles.

Para cada tipología de priorización (ver sección 3.3) y estado actual (Tabla 3) se estableció que alternativa o subconjunto de alternativas entre las posibles (Tabla 3) era viable. Así, por ejemplo, para un polígono con estado ‘matorral’ afectado por la priorización de potenciar la actividad agroganadera, las alternativas posibles serán S-A o S-P (matorral a cultivo o matorral a prado, respectivamente). No obstante, para que las alternativas posibles puedan considerarse viables, es necesario que el polígono cumpla con las condiciones específicas definidas para cada alternativa, como las relacionadas con la pendiente o la orientación. Así, se generó una versión reducida del espacio de decisión que solo incluía las alternativas viables una vez aplicadas las priorizaciones en los polígonos afectados. En los que no había ninguna priorización se mantuvieron todas las alternativas. El espacio de decisión reducido se completó con la estimación de los servicios ecosistémicos seleccionados (Tabla 2) para cuatro momentos temporales (2020 – 2030 – 2040 – 2050) correspondientes a los períodos simulados (ver sección 3.5).

Finalmente, se desarrolló un módulo de optimización lineal entera mixta para resolver de forma exacta (en contraposición a una resolución heurística) el problema de encontrar que combinación de alternativas (una para cada polígono) permite maximizar (o minimizar, si fuese el caso) los objetivos globales priorizados para el conjunto del paisaje. Los modelos exactos ofrecen una cuantificación de la calidad de cada solución (también conocida como el *gap* de la solución) y garantizan la obtención de óptimos globales, no así los métodos heurísticos (HANSON et al. 2019). Cada objetivo global estuvo asociado a uno o varios servicios ecosistémicos incluidos en el espacio de decisión.

Tabla 3. Alternativas de cambio de estado consideradas para las áreas piloto.

Código de la alternativa	Estado actual	Estado potencial
F_F	FOREST	FOREST_NOMAN
F_A	FOREST	AGRICULTURE
F_P	FOREST	PASTURE
F_U	FOREST	URBAN
F_BAU	FOREST	FOREST_BAU

F_MULTIFUN	FOREST	FOREST_MULTIFUN
F_NATUR	FOREST	FOREST_NATUR
F_ADEVE	FOREST	FOREST_ADEVE
S_S	SHRUBLAND	SHRUBLAND
S_A	SHRUBLAND	AGRICULTURE
S_P	SHRUBLAND	PASTURE
S_F	SHRUBLAND	FOREST_NOMAN
S_U	SHRUBLAND	URBAN
A_A	AGRICULTURE	AGRICULTURE
A_P	AGRICULTURE	PASTURE
A_S	AGRICULTURE	SHRUBLAND
A_U	AGRICULTURE	URBAN
P_P	PASTURE	PASTURE
P_A	PASTURE	AGRICULTURE
P_S	PASTURE	SHRUBLAND
P_U	PASTURE	URBAN
B_B	BARESOIL	BARESOIL
U_U	URBAN	URBAN
W_W	WATER	WATER

3.7. Visualización de las alternativas de gestión forestal y estimación de la provisión de servicios ecosistémicos

Se empleó tecnología ArcGIS Enterprise para crear un visor en formato StoryMap, una herramienta para presentar y describir un área piloto con la ayuda de mapas, fotografías, textos, gráficas y representaciones en 3D en un entorno web. Además de una presentación general del área piloto siguiendo la filosofía StoryMap, se desarrollaron dos secciones que dan contenido al visor. Una primera está enfocada a comparar el estado actual versus el futuro de la distribución de las cubiertas del suelo, y una segunda a comparar la provisión de servicios ecosistémicos. Una tercera sección ilustra a escala de paisaje y a escala de rodal el efecto de las cinco alternativas de gestión consideradas (ver sección 3.4) en la composición y estructura de las masas, empleando representaciones 3D de los árboles.

4. Resultados

Se presentan los resultados de los procesos de imputación forestal, modelización de la dinámica forestal y optimización multiobjetivo para alguna o algunas de las áreas piloto a modo ejemplo.

Con la metodología de optimización *simulated annealing* se obtuvo la métrica de similitud forestal óptima para cada área piloto. Según esta métrica, el algoritmo kNN retornó las $k=3$ parcelas de inventario más similares a cada localización (celda ráster de 20 m) con un grado de similitud asociado. Así, para cada celda ráster, a partir de las $k=3$ distribuciones de clases diamétricas por especie de dichas parcelas, se construyó esta misma distribución ponderando la densidad de cada árbol representativo por el peso de similitud de cada parcela. Finalmente se agregaron las distribuciones de todas las celdas ráster contenidas en cada rodal y se construyó una distribución con clases diamétricas de 1 cm por especie. A partir de esta imputación forestal se calcularon las variables forestales tipo para los rodales de cada área piloto (Figura 5 y Tabla 4).

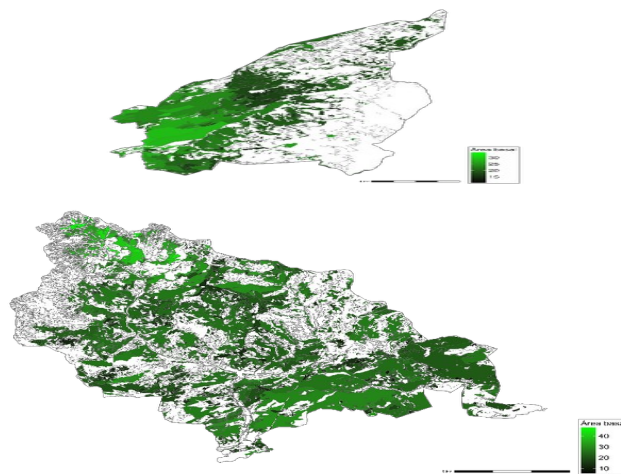


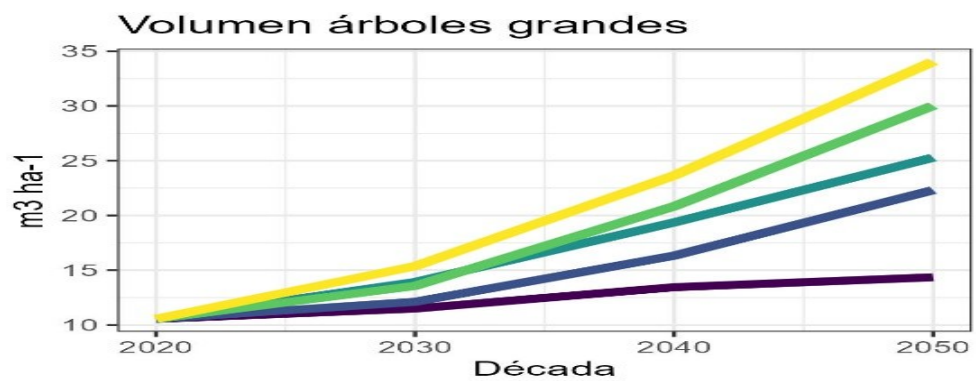
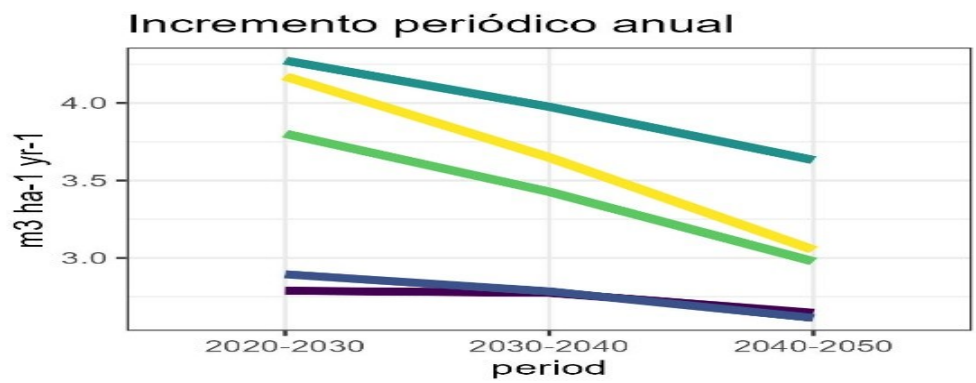
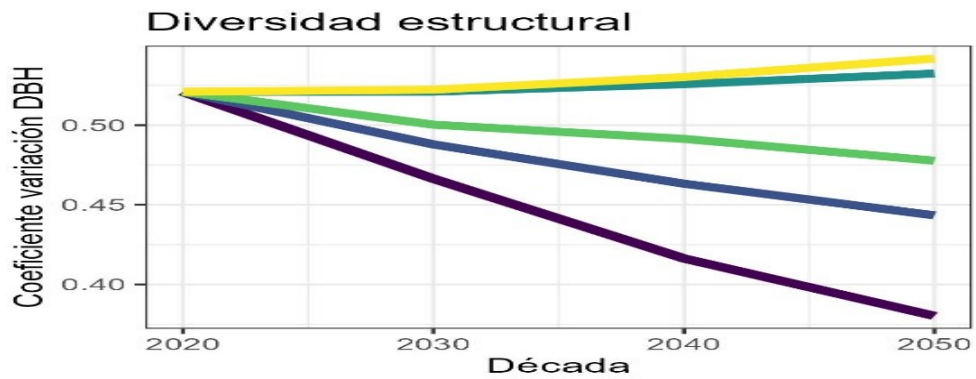
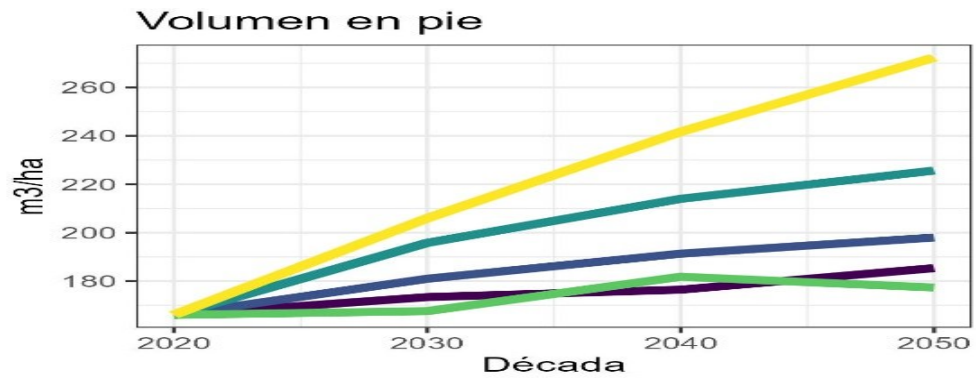
Figura 5. Resultado cartográfico de la imputación forestal para Terres de l'Ebre (izquierda) y Vall de Camprodon (derecha).

Tabla 4. Variables forestales a nivel de rodal resultado de la imputación forestal (valor medio y [rango]) en las cuatro áreas piloto.

Variable forestal	Soriguera	Terres de l'Ebre	Vall de Camprodon	Vall de Carme
24.7 [6.0 – 43.9]	20.2 [10.4 – 34.5]	23.6 [5.5 – 47.9]	15.8 [3.8 – 38.7]	
152.5 [55.7 – 299.0]	120.6 [47.6 – 215.7]	139.3 [20.6 – 358.9]	88.4 [19.9 – 253.3]	
144.5 [54.5 – 308.5]	141.4 [61.9 – 274.1]	194.2 [41.8 – 455.3]	97.0 [17.1 – 304.7]	
786 [461 – 1241]	747 [254 – 1237]	912 [256 – 2190]	690 [225 – 2134]	
17.8 [10.6 – 22.6]	16.9 [13.6 – 22.1]	16.2 [10.3 – 24.6]	15.7 [9.9 – 29.7]	
9.3 [4.8 – 13.3]	8.2 [6.5 – 10.5]	9.1 [4.6 – 15.0]	7.7 [4.3 – 8.8]	

La simulación de la dinámica forestal a lo largo de tres décadas (2021 – 2050) en función del itinerario silvícola aplicado sistemáticamente a todos los rodales retornó en cada paso temporal, la actualización de la distribución de clases diamétricas por especie, así como los árboles (identificados por la especie, el diámetro y la altura) que fueron cortados como aquellos que sufrieron un episodio de mortalidad. Esto permite entender el efecto de uno u otro itinerario en el volumen en pie, el incremento periódico anual, el volumen medio extraído, la cantidad de biomasa muerta o variables relacionadas con la biodiversidad potencial (Figura 6).

La optimización multiobjetivo, priorizando equitativamente la provisión de agua azul, el indicador agregado de biodiversidad (Tabla 2), la carga ganadera y la reducción de la carga de combustible en superficie, en Soriguera, dio por resultado un paisaje mosaico a 2050 con un claro aumento de las zonas de prados y herbazales y una predominancia de silvicultura naturalística, respetando ciertas zonas a evolución natural y promoviendo el adehesamiento para prevención de incendios y fines silvopastorales en zonas aptas para la ganadería extensiva (Figura 7). Para ejemplificar que la priorización de distintos objetivos da lugar a propuestas distintas de paisajes, en Terres de l'Ebre, por ejemplo, la maximización de la biodiversidad versus la maximización del agua azul (manteniendo la maximización de la carga ganadera y la minimización de la carga de combustible) conllevó que una mayor área arbolada fuese destinada a evolución natural versus aplicar una gestión naturalística (Figura 8).



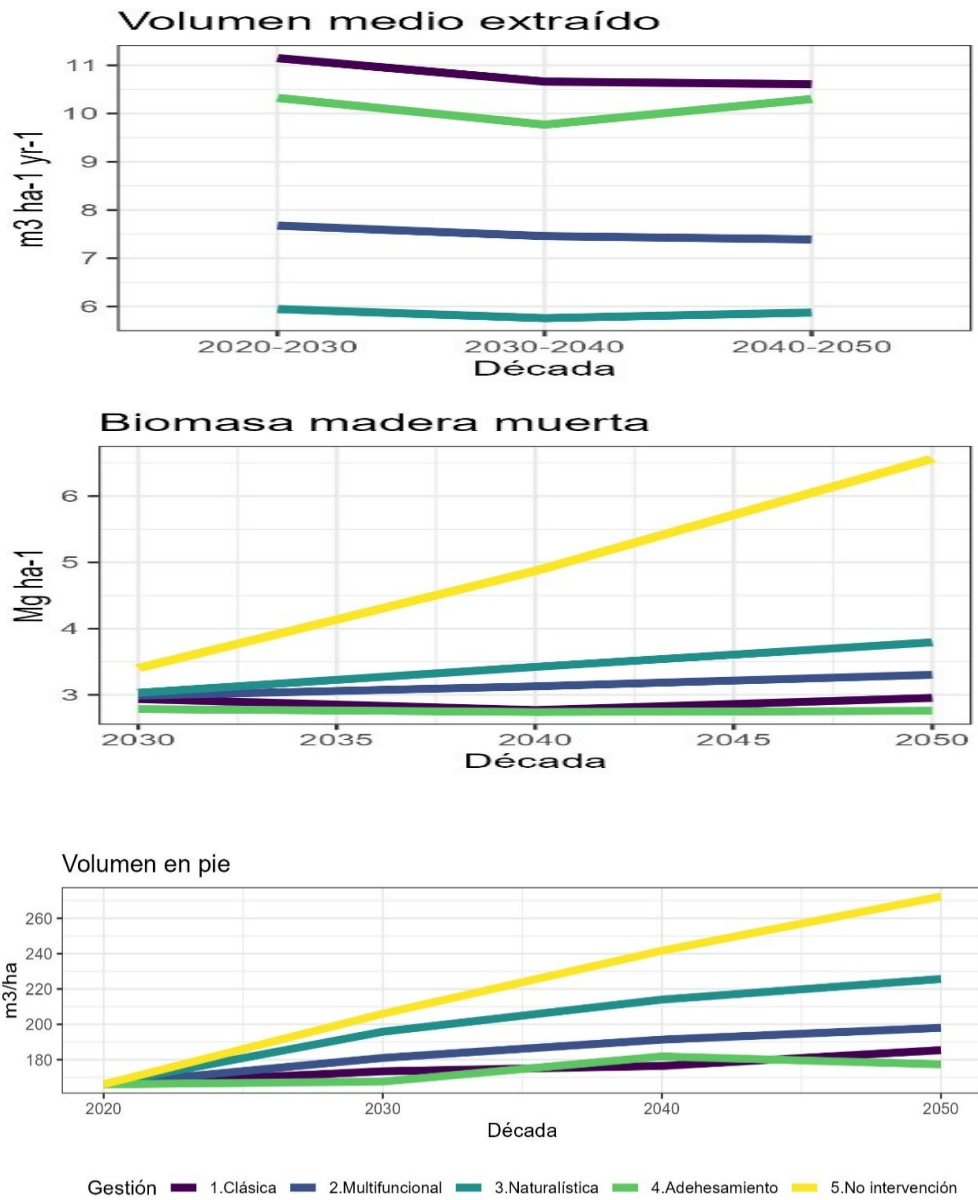
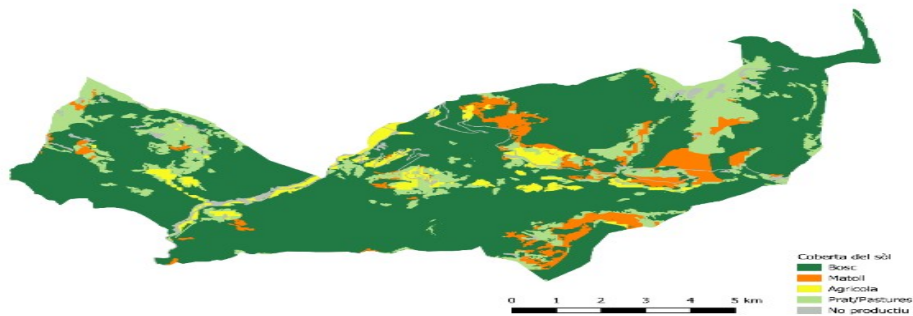


Figura 6. Evolución temporal de seis variables forestales según el itinerario silvícola aplicado a los rodales de Soriguera entre 2020 y 2050.



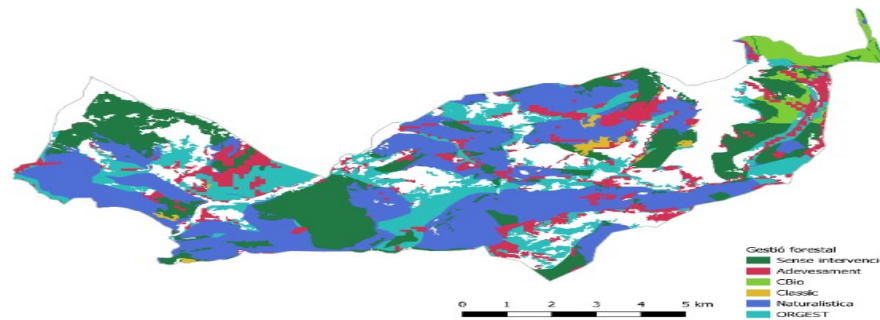


Figura 7. Propuesta de paisaje agroforestal resiliente (izquierda) y propuesta de gestión forestal de las zonas arboladas (derecha) a 2050 para Soriguera.

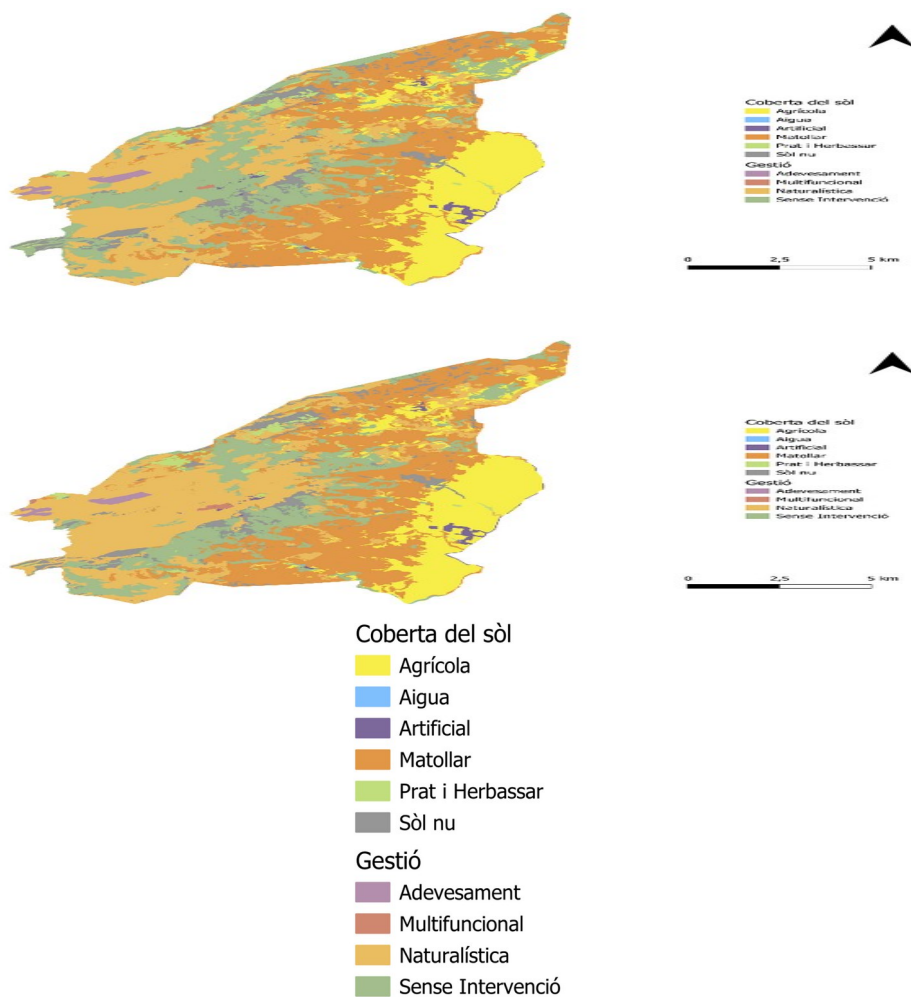


Figura 8. Propuesta de paisaje agroforestal resiliente (izquierda) y propuesta de gestión forestal de las zonas arboladas (derecha) a 2050 para Terres de l'Ebre.

El visor FORMES está actualmente desarrollado para el área piloto de Soriguera (Figura 2). La descripción del municipio incluye elementos referentes a la situación, topografía, áreas protegidas y titularidad forestal. La sección para comparar la provisión de servicios ecosistémicos permite visualizar tres mapas de forma sincronizada que describen dicha provisión a nivel de polígono (Figura 9).

Además, se calcula el total de la provisión por cubierta del suelo. Estos valores se actualizan con el nivel de zoom. Los tres mapas corresponden a la provisión actual, futura si se mantiene el patrón de gestión de las últimas tres décadas y futura si se adoptan medidas para la resiliencia. El visor de parcelas ofrece una primera representación del estado actual de las masas forestales a escala de paisaje (Figura 10). Al seleccionar un rodal, se informa de la especie dominante, de la distribución de diámetros, de la distribución de alturas y del valor promedio y rango de las principales variables dasométricas. También permite filtrar uno de los itinerarios silvícolas simulados (ver sección 3.4) y para el rodal seleccionado ejemplificar la evolución en 3D de la masa a lo largo de los cuatro momentos temporales simulados (Figura 10).

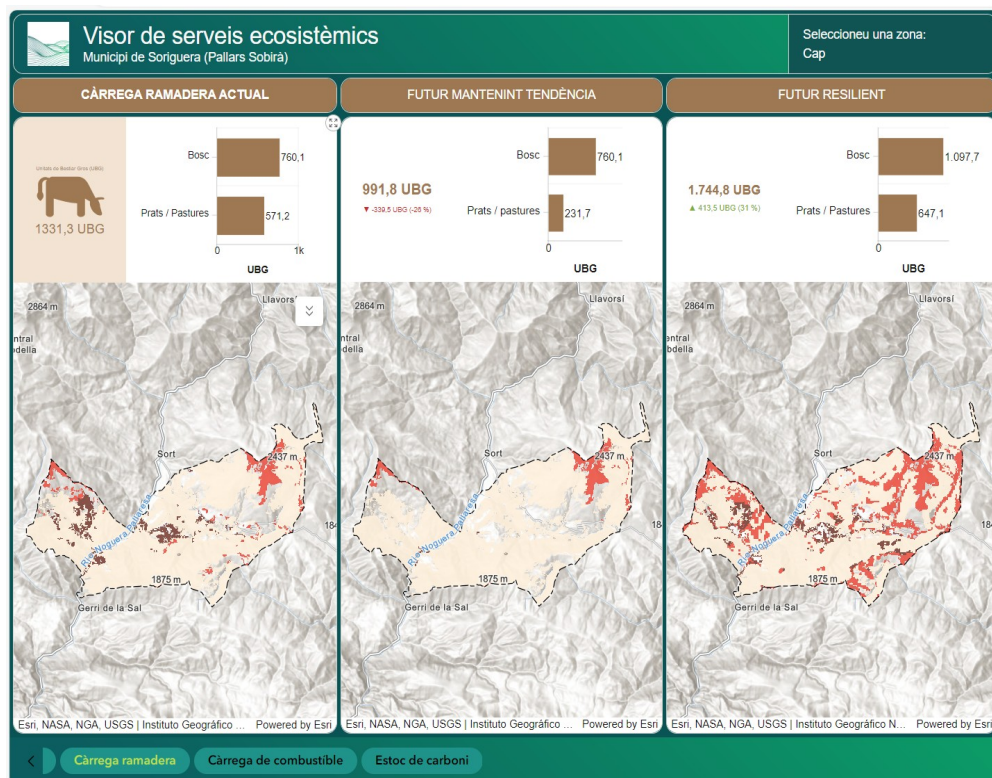


Figura 9. Sección del visor FORMES para la comparativa de la provisión de servicios ecosistémicos.

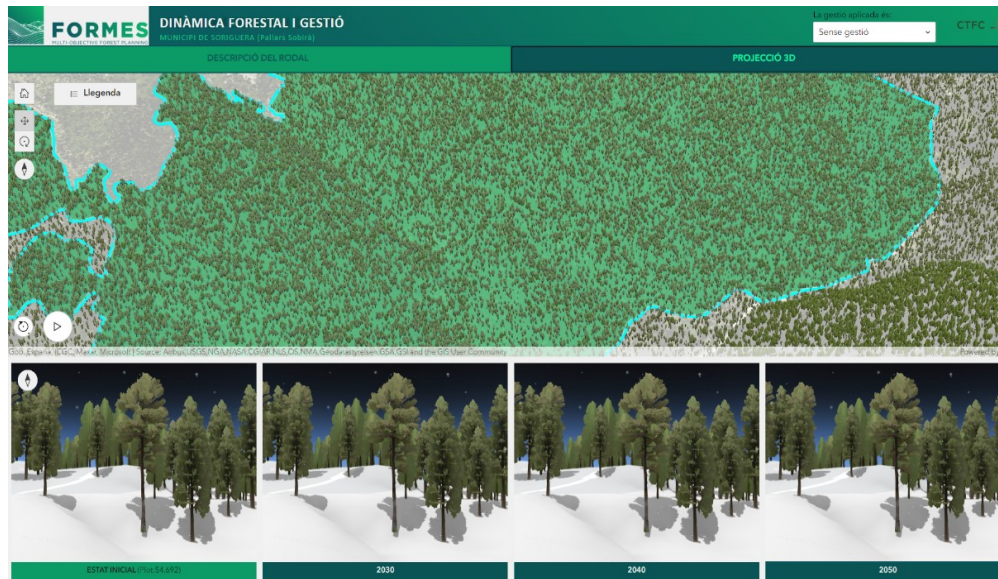


Figura 10. Sección del visor FORMES para la representación de la evolución de las masas forestales bajo diferentes itinerarios silvícolas a lo largo de 30 años.

5. Discusión

Con el objetivo de elaborar para cada área piloto un plan de gestión para implementar el concepto de paisaje agroforestal resiliente basado en premisas globales, al mismo tiempo que se incorporan las priorizaciones espaciales por parte de los técnicos expertos y se incluyen los acuerdos necesarios respecto a las zonas de solapamiento de las diferentes priorizaciones, se ha desarrollado un trabajo de análisis y diagnóstico que integra variables ambientales, sociales y económicas que convergen todas ellas en la matriz física, en el paisaje, de cada una de las áreas piloto.

Dicho trabajo se respalda en metodologías científicas innovadoras tanto para la caracterización de la composición y la estructura de las masas forestales de un paisaje (CHIRICI et al. 2016), la modelización de la dinámica del paisaje y de la dinámica forestal según condiciones ambientales cambiantes y bajo múltiples alternativas de gestión (BLANCO et al., 2020), la estimación de múltiples indicadores a partir de las simulaciones de diferentes alternativas y representativos de las premisas globales de resiliencia asociadas a los paisajes agroforestales Mediterráneos (BLATTERT et al., 2017), como para la optimización espacial multiobjetivo, en este caso, utilizando programación entera mixta (SCHUSTER et al., 2020). Como resultado de la aplicación de estas metodologías a todo el conjunto de datos e información recopilada para cada área de estudio, se ofrece una visión estratégica de un paisaje resiliente futuro, alcanzada a través de la gestión sostenible, consensuada y optimizada del territorio.

El proceso de participación de las partes interesadas, ya sean técnicos de la administración general, técnicos territoriales especializados o propietarios, ha sido una pieza clave en la definición de los criterios y objetivos de gestión (LI et al.,



2024). Esto asegura que las voces de la comunidad local y los expertos tanto del ámbito académico como de la administración sean consideradas todas ellas durante el proceso de la toma de decisiones. Así, es decisivo consensuar la importancia relativa, a través de la asignación de pesos o ponderaciones, de los indicadores que miden el logro de los objetivos estratégicos. De hecho, esta ponderación ayuda a priorizar las acciones y los recursos en función de las necesidades más relevantes. Otro punto decisivo, por tanto, en la aplicación de esta serie de metodologías para elaborar una planificación estratégica, es determinar una lista de indicadores específicos relacionados con la resiliencia y la sostenibilidad de los ecosistemas agroforestales (TIEMANN & RING, 2022). Estos indicadores sirven como marco para evaluar el éxito de las estrategias de gestión y poder comparar su efectividad a corto y medio plazo para alcanzar los objetivos globales marcados.

La inclusión de áreas estratégicas, de forma espacialmente explícita a través de cartografía específica, ya sea para la priorización o potenciación de una actividad concreta o bien como medida para indicar una o varias restricciones resulta fundamental para elaborar una propuesta adaptada a la realidad local de cada paisaje (LAKE et al., 2018). En este contexto, las restricciones hacen referencia a acciones de gestión (como un cierto cambio de cubierta del suelo o un tipo de gestión forestal) que no deberían aplicarse, pues van en detrimento de ciertos valores ecológicos o socioeconómicos que deben preservarse. La incorporación de dichas zonificaciones en el sistema de optimización multiatributo, así como los resultados de la resolución de solapamientos no sinérgicos, garantiza que la solución de paisaje agroforestal resiliente propuesta tenga en cuenta las planificaciones actuales, el marco normativo (ya sea europeo, nacional o regional) y las propuestas de carácter local para dirigir al paisaje hacia un estado que permita garantizar la provisión sostenible a largo plazo de múltiples servicios ecosistémicos al mismo tiempo que las actividades socioeconómicas propias de la región se ven fortalecidas.

Los ejercicios de planificación estratégica llevados a cabo en las cuatro áreas piloto, en el marco de la implementación de la Estrategia de la Bioeconomía de Cataluña 2030, han resultado un marco excepcional para mejorar y testar la flexibilidad y generalidad del sistema de planificación forestal multiobjetivo FORMES tanto para capturar diferentes realidades ecológicas y socioeconómicas (Tabla 1) como para la incorporación de los agentes del territorio en el proceso de codiseño (Figura 1). Esto ha sido posible gracias a que el sistema está robustamente basado en unos modelos empíricos de dinámica forestal sensibles a las condiciones medioambientales que han sido contrastados, calibrados y validados para 27 especies o grupos de especies con toda la información disponible más actual de la serie del Inventario Forestal Nacional de España. Aun así, todo sistema de modelización es siempre sujeto de mejora, pudiendo incorporar nuevos procesos, cambiar la aproximación metodológica para replicar uno u otro proceso, modificar la resolución temporal o incorporar múltiples fuentes de datos para conferir mayor robustez a las proyecciones que se deriven de él (LANDSBERG 2003).

Acoplar un módulo de gestión forestal a los modelos que simulan la dinámica



forestal a escala de árbol individual, da lugar a poder explorar un amplio rango de alternativas de gestión silvícola. En este ejercicio, solo se han especificado a nivel de especie (o grupo de especies) cuatro prescripciones silvícolas que se han aplicado de forma generalizada a las cuatro áreas piloto. Sin embargo, dichas prescripciones silvícolas no tienen en cuenta la calidad de estación y, por tanto, omiten de forma indirecta, la regeneración de la masa posterior a una intervención silvícola. Sería pues conveniente que dichas prescripciones estuviesen adaptadas a una serie de tipologías forestales arboladas definidas en base a la formación arbolada (que se define según la especie o mezcla de especies dominantes o por la especial singularidad de la estructura de su vegetación) y a la calidad de estación (que recoge variables como el clima, la topografía, la roca madre, o la estructura del suelo) (PIQUÉ et al, 2014). Del mismo modo, la aplicación generalizada de dichas prescripciones silvícolas no contempla la vocación principal o idoneidad de uso que cada masa forestal y puede presentar limitaciones para ofrecer una provisión de servicios ecosistémicos óptima (KRSNIK et al., 2023). Así, una masa forestal puede orientarse a través de la gestión a una idoneidad de uso reproductiva, protectora, orientada a la conservación, social o multifuncional. En futuras ediciones, se podría pues considerar la información de la idoneidad de uso de las masas forestales para guiar y perfilar las prescripciones silvícolas a aplicar.

Las capacidades que se han mostrado y conforman el sistema de planificación multiobjetivo FORMES, lo convierten en una herramienta integral para explorar estrategias de gestión a escala de paisaje que incorporen premisas globales de resiliencia válidas para paisajes agroforestales Mediterráneos, como lo son la conservación de la biodiversidad, la producción agroganadera, la provisión de agua azul y la reducción del riesgo de incendios, así como las perspectivas, voluntades, requisitos, y restricciones expresadas y aportadas por múltiples agentes del territorio con conocimiento de las condiciones ecológicas y socio-económicas de un área de estudio determinada.

6. Conclusiones

El sistema de proyección FORMES para la planificación forestal multiobjetivo ofrece un marco de trabajo excepcional para guiar a los gestores del territorio en la planificación estratégica. Con ello se pretende contribuir al codiseño de un paisaje agroforestal resiliente que responda a premisas globales de resiliencia en un contexto Mediterráneo, en concreto lo son la provisión de agua azul, la reducción del riesgo de incendio, la conservación de la biodiversidad y los hábitats y la promoción de actividades agrícolas y ganaderas sostenibles, al mismo tiempo que se incorporan de forma consensuada las priorizaciones espaciales dictadas por los técnicos territoriales.

En este ejercicio, se han utilizado herramientas y metodologías avanzadas como la imputación forestal basada en datos de inventario forestal y datos LiDAR, modelos de dinámica y gestión forestal sensibles al clima, métodos de optimización exacta y análisis multiatributo para tomar decisiones informadas, basadas en datos y evidencias. Estas herramientas ofrecen una base sólida para la mejora de la



gestión de los paisajes agroforestales y la preservación de sus servicios ecosistémicos en un contexto de incertidumbre ambiental y socioeconómica.

7. Agradecimientos

Agradecemos a los compañeros del CTFC que han aportado sus valoraciones y criterios para enriquecer la planificación estratégica de las áreas piloto, y a los compañeros del Gabinete técnico del Departamento de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación de la Generalitat de Catalunya por su compromiso en la promoción de paisajes agroforestales resilientes.

8. Bibliografía

ÁLVAREZ-MIRANDA E.; SALGADO-ROJAS J.; HERMOSO V.; GARCIA-GONZALO J.; WEINTRAUB A.; 2020. An integer programming method for the design of multi-criteria multi-action conservation plans. *Omega*, 92, p.102147.

ARULDOSS M.; LAKSHMI T.M.; VENKATESAN V.P.; 2013. A survey on multi criteria decision making methods and its applications. *American Journal of Information Systems*, 1(1), pp.31-43.

BAIGES T., CERVERA T.; PALERO N.; GONIN P.; LARRIEU P.; 2019. Posada a Punt de L'Índex de Biodiversitat Potencial: Un Termòmetre Per a Mesurar La Capacitat d'allotjar Biodiversitat Dels Boscos. *Silvicultura* 80: 26–36.

BARTON D.; PETERSON C.; 2017. Sustainability and forest management: A multi-objective approach. *Environmental Science & Policy*, 77, 56-64.

BLANCO J.A.; AMEZTEGUI, A.; RODRÍGUEZ, F.; 2020. Modelling Forest Ecosystems: A crossroad between scales, techniques and applications. *Ecological Modelling*, 425, p.109030.

BLATTERT C.; LEMM R.; THEES O.; LEXER M.J.; HANEWINKEL M.; 2017. Management of ecosystem services in mountain forests: Review of indicators and value functions for model based multi-criteria decision analysis. *Ecological Indicators*, 79, pp.391-409.

CHANG C.Y.; 2021. Local landscape planning and management in rural areas. *Landscape and Ecological Engineering*, 17(3), pp.295-298.

CHIRICI G.; MURA M.; MCINERNEY D.; PY N.; TOMPPA E.O.; WASER L.T.; TRAVAGLINI, D.; MCROBERTS R.E.; 2016. A meta-analysis and review of the



literature on the k-Nearest Neighbors technique for forestry applications that use remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 176, pp.282-294.

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.

GARCÍA-VALDÉS R.; ZAVALA M.A.; ARAÚJO M.B.; PURVES D.W.; 2013. Chasing a moving target: projecting climate change-induced shifts in non-equilibrium tree species distributions. *Journal of Ecology*, 101(2), pp.441-453.

HANSON J.O.; SCHUSTER R.; STRIMAS-MACKEY M.; BENNETT J.R.; 2019. Optimality in prioritizing conservation projects. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(10), pp.1655-1663.

KANGAS A.; KURTTILA M.; HUJALA T.; EYVINDSON K.; KANGAS K.; 2015. Decision support for forest management, second edition. In: *Managing Forest Ecosystems*, 30. Springer, Cham Heidelberg New York Dordrecht London. 307 pp. ISBN 978-3-319-23521-9.

KRSNIK G.; BUSQUETS E.; PIQUÉ M.; LARRAÑAGA A.; CARDIL A.; GARCÍA-GONZALO J.; GONZÁLEZ-OLABARRIA J. R.; 2020. Regional level data server for fire hazard evaluation and fuel treatments planning. *Remote Sensing*, 12(24), 4124.

KRSNIK G.; REYNOLDS K.M.; MURPHY P.; PAPLANUS S.; GARCIA-GONZALO J.; GONZÁLEZ-OLABARRIA J.R.; 2023. Forest use suitability: Towards decision-making-oriented sustainable management of forest ecosystem services. *Geography and Sustainability*, 4(4), pp.414-427.

LAKE F.K.; PARROTTA J.; GIARDINA C.P.; DAVIDSON-HUNT I.; UPRETY Y.; 2018. Integration of traditional and Western knowledge in forest landscape restoration. In *Forest landscape restoration* (pp. 198-226). Routledge.

LANDSBERG J.; 2003. Modelling forest ecosystems: state of the art, challenges, and future directions. *Canadian Journal of Forest Research*, 33(3), pp.385-397.

LARRIEU L.; GONIN P.; 2008. L'indice de Biodiversité Potentielle (IBP): une méthode simple et rapide pour évaluer la biodiversité potentielle des peuplements forestiers. *Revue forestière française*. 06-2018; pp. 727-748.

LI Y.; ABU BAKAR N. A.; ISMAMIL N. A.; MOHD ARIFFIN N. F.; MUNDHER R.; 2024. Stakeholder involvement and preferences in landscape protection decision-



making: a systematic literature review. *Frontiers in Communication*, 9, p.1340026.

MÜLLER, F.; Turner, R. K.; 2017. Ecosystem services and forest management: Forest ecosystem services: A conceptual framework. *Forest Ecology and Management*, 381, 1-15.

PIQUÉ M.; VERICAT P.; CERVERA T.; BAIGES T.; FARRIOL R.; 2014. Tipologies forestals arbrades. 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.

PUKKALA T.; 2016. Multi-objective forest planning. *Forest Ecosystems*, 3(1), 1-12.

PUKKALA T.; AQUILUÉ N.; JUST A.; CORBERA J.; TRASOBARES A.; 2024. Developing kNN forest data imputation for Catalonia. *Journal of Forestry Research*, 35(1), p.80.

REED M. S.; 2008. Stakeholder participation for environmental management: A literature review. *Biological Conservation*, 141(10), 2417-2431.

RUÍZ-PEINADO R.; RIO M.; MONTERO G.; 2011. New models for estimating the carbon sink capacity of Spanish. *Forest Systems*, 20:176–188.

RUÍZ-PEINADO R.; MONTERO G.; RIO M.; 2012. Biomass models to estimate carbon stocks for hardwood tree species. *Forest Systems*, 21:42.

SCHUSTER, R.; HANSON J.O.; STRIAMAS-MACKEY M.; BENNETT J.R.; 2020. Exact integer linear programming solvers outperform simulated annealing for solving conservation planning problems. *PeerJ*, 8, p.e9258.

SEARLE E.; VELDMAN J. W.; 2020. The impacts of climate change on forest dynamics and management. *Current Forestry Reports*, 6(4), 175-186.

TIEMANN A.; RING I.; 2022. Towards ecosystem service assessment: Developing biophysical indicators for forest ecosystem services. *Ecological Indicators*, 137, p.108704.

TRASOBARES A.; MOLA-YUDEGO B.; AQUILUÉ N.; GONZÁLEZ-OLABARRIA J.R.; GARCIA-GONZALO J.; GARCÍA-VALDÉS R.; DE CÁCERES M.; 2022. Nationwide climate-sensitive models for stand dynamics and forest scenario simulation. *Forest Ecology and Management*, 505, p.119909.