



2025 | **16-20**
GIJÓN | **JUNIO**

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1297

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

Organiza





Idoneidad del uso forestal: hacia una gestión más eficaz de los servicios ecosistémicos

KRSNIK, G. (1), REYNOLDS, K. (2), AQUILUÉ, N. (1), MOLA-YUDEGO, B. (3), PECURUL-BOTINES, M. (1), GARCIA-GONZALO, J. (1) y GONZÁLEZ OLABARRIA, J.R. (1)

(1) Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya

(2) US Forest Service, Pacific NW Station

(3) University of Eastern Finland

Resumen

Adoptar un enfoque multicriterio en la gestión forestal es esencial para preservar o mejorar beneficios específicos mientras se minimizan los impactos ambientales negativos. La gestión a largo plazo de un bosque debe considerar factores ambientales y sociales diversos, así como cambios en las características forestales con el tiempo. Una evaluación estratégica de la idoneidad del uso forestal (IUF) (productiva, protectora, social, orientada a la conservación o multifuncional) a nivel nacional, que considere la dinámica de los servicios ecosistémicos y los trade-offs entre las alternativas de IUF, puede guiar el desarrollo de estrategias de gestión personalizadas.

Este estudio evalúa los cambios en el tiempo de diversos servicios ecosistémicos de los rodales de *Pinus sylvestris* en España, utilizando un modelo de decisión para identificar la alternativa de IUF más adecuada que mejore la provisión de estos servicios. Para ello, se empleó la última versión del sistema de apoyo a la decisión de gestión de ecosistemas (EMDS), junto con planificación participativa, modelos geoespaciales y análisis del Proceso de Jerarquía Analítica (AHP). Según los resultados, la IUF dominante es la protectora, seguida por la productiva, mostrando altos niveles de multifuncionalidad.

Palabras clave

Análisis multicriterio, gestión geoespacial, servicios ecosistémicos forestales, toma de decisiones.

1. Introducción

La gestión forestal es un proceso complejo que involucra factores ecológicos, socioeconómicos y políticos, y requiere la consideración de múltiples elementos potencialmente conflictivos (ANANDA & HERATH, 2009). Las prácticas de gestión inadecuadas pueden influir negativamente en la provisión de servicios ecosistémicos (SE) y causar degradación ambiental, lo que resalta la importancia de establecer objetivos de sostenibilidad en la planificación estratégica (DADE et al., 2019). Los bosques ofrecen diversos SE que dependen de sus características intrínsecas; sin embargo, las relaciones entre servicios limitan su capacidad para proporcionar múltiples SE de forma sostenible. Por ello, las estrategias de gestión deben maximizar ciertos usos mientras minimizan impactos negativos sobre otros SE (MARTÍN-LÓPEZ et al., 2014).



Los enfoques multicriterio permiten abordar la complejidad de los procesos de toma de decisiones, ayudando a identificar opciones de gestión adecuadas incluso frente a incertidumbres o cambios futuros. Las características de los bosques cambian constantemente, lo que afecta la provisión de SE y subraya la necesidad de estrategias basadas no solo en características actuales, sino también en dinámicas futuras (SHIFLEY et al., 2017). La gestión sostenible a mediano y largo plazo requiere proyecciones de dinámicas forestales, considerando variaciones espaciales y temporales. Estas proyecciones ofrecen una perspectiva de largo plazo sobre patrones de vegetación y mejoran la toma de decisiones (ALBERT et al., 2015). Sin embargo, la competencia entre intereses puede dificultar las estrategias sostenibles y llevar a decisiones destructivas a largo plazo. Modelos que anticipen dinámicas forestales y resalten características agregadas, incluida la provisión de SE, son esenciales para estrategias de gestión adecuadas (SIYUM, 2020).

La asignación de usos forestales específicos en función de los SE que cada bosque puede ofrecer ayuda a reducir alternativas de gestión y mejora la planificación espacial. Los modelos matemáticos y de simulación han demostrado ser herramientas útiles para evaluar dinámicas forestales y prever cambios en la provisión de SE. Estas simulaciones, junto con el mapeo de SE, son pasos iniciales recomendados para una planificación integral a largo plazo (REED & BROWN, 2003).

El modelado espacial de los indicadores de SE es un desafío debido a la heterogeneidad de factores y beneficios asociados. Si bien las estrategias de gestión dependen de estos modelos, su precisión y validez son cruciales (MCDONOUGH et al., 2017). La inclusión de métricas dinámicas permite una planificación más precisa al simular características forestales futuras, aunque limita la selección de indicadores disponibles. Además, las diferencias terminológicas en los estudios de SE han dificultado la creación de un marco coherente. Por ello, es necesario evaluar la provisión de SE, considerando las dinámicas forestales y los cambios en la oferta de servicios, y asignar usos adecuados mediante enfoques multicriterio (ZANCHI & BRADY, 2019).

El concepto de "Idoneidad de Uso Forestal" (IUF) (inglés: Forest Use Suitability, FUS) clasifica los usos forestales en productivo, protector, orientado a la conservación, social y multifuncional, asociados con acciones de gestión específicas. Una IUF productiva prioriza la rentabilidad económica, mientras que una IUF protectora se enfoca en mitigar procesos perjudiciales a largo plazo. La IUF orientada a la conservación resalta el valor del hábitat, la social promueve beneficios para la salud humana, y la multifuncional combina varios usos (KRSNIK et al., 2023). La variabilidad estructural y ambiental de los bosques de *Pinus sylvestris* en España ofrece una oportunidad para evaluar la asignación de IUF, pero también plantea desafíos relacionados con la comprensión de sus dinámicas específicas. Evaluar estas dinámicas bajo un escenario sin gestión permite identificar la capacidad del bosque para ofrecer SE. Adicionalmente, un proceso participativo para definir objetivos y evaluar compromisos entre ellos puede fortalecer la planificación estratégica.



Aunque ha aumentado el interés en la evaluación de SE, los estudios que relacionan las dinámicas de SE con la toma de decisiones a largo plazo en gestión forestal son limitados y emplean enfoques metodológicos diversos. En este contexto, el sistema de Soporte para la Toma de Decisiones de Gestión de Ecosistemas (Ecosystem Management Decision Support, EMDS) se utiliza para asignar y definir IUF en bosques seleccionados de España. Este marco de soporte para análisis espaciales y planificación ambiental maneja la complejidad de decisiones estratégicas multicriterio en la asignación de IUF.

2. Objetivos

El objetivo principal del estudio es asignar direcciones de planificación basadas en características biofísicas dinámicas de los bosques, definiendo indicadores de SE y simulando sus dinámicas. Estas simulaciones sirven como base para evaluar y priorizar IUF, proporcionando una metodología que no busca definir acciones específicas, sino sentar las bases para una mejor planificación forestal a nivel de paisaje. Este enfoque también puede aplicarse en otros contextos geográficos, mejorando la sostenibilidad y la planificación a largo plazo.

3. Metodología

a. Área de estudio

El área de estudio incluyó todos los rodales forestales españoles donde *Pinus sylvestris* L. estaba presente, ya fuera como especie dominante o no (Figura 1). El análisis se basó en el tercer Inventario Forestal Nacional de España (IFN3; aproximadamente 91.900 parcelas), de las cuales se identificaron 10.033 parcelas con *P. sylvestris* para los cálculos.

Pinus sylvestris representa el 14% (153 millones de m³) del volumen total de madera en España, siendo la segunda especie en volumen después de *Pinus pinaster*. Ocupa una superficie aproximada de 1 millón de hectáreas, siendo la segunda conífera en extensión tras *Pinus halepensis*. Los bosques españoles, predominantemente de propiedad privada (aproximadamente 70%), presentan una alta fragmentación espacial, lo que dificulta significativamente la planificación efectiva de la gestión forestal a largo plazo (COLL et al., 2011).



Figura 1. Área de estudio

3.

a. Diseño conceptual

El estudio tiene como objetivo asignar una IUF a cada parcela del Inventario Forestal Nacional con presencia de *Pinus sylvestris*, basándose en simulaciones temporales de la dinámica forestal y los SE. Este proceso incluyó cuatro pasos:

1. Definir indicadores de SE: Se identificaron 13 métricas, dinámicas y estáticas, como bases para evaluar el IUF.
2. Simular dinámica forestal: Se modelaron las características de 10,033 parcelas durante 100 años bajo un escenario de no gestión, utilizando el sistema FORMES.
3. Evaluar IUF: Mediante una herramienta multicriterio, se calcularon valores para cinco alternativas de IUF (productiva, protectora, orientada a la conservación, social, multifuncional), considerando la provisión actual y futura de SE y un análisis participativo.
4. Análisis de robustez: Se priorizaron IUF primarias y secundarias según los valores obtenidos, identificando la más adecuada para cada parcela.

El enfoque combina simulaciones a largo plazo, análisis multicriterio y participación para optimizar la planificación forestal.

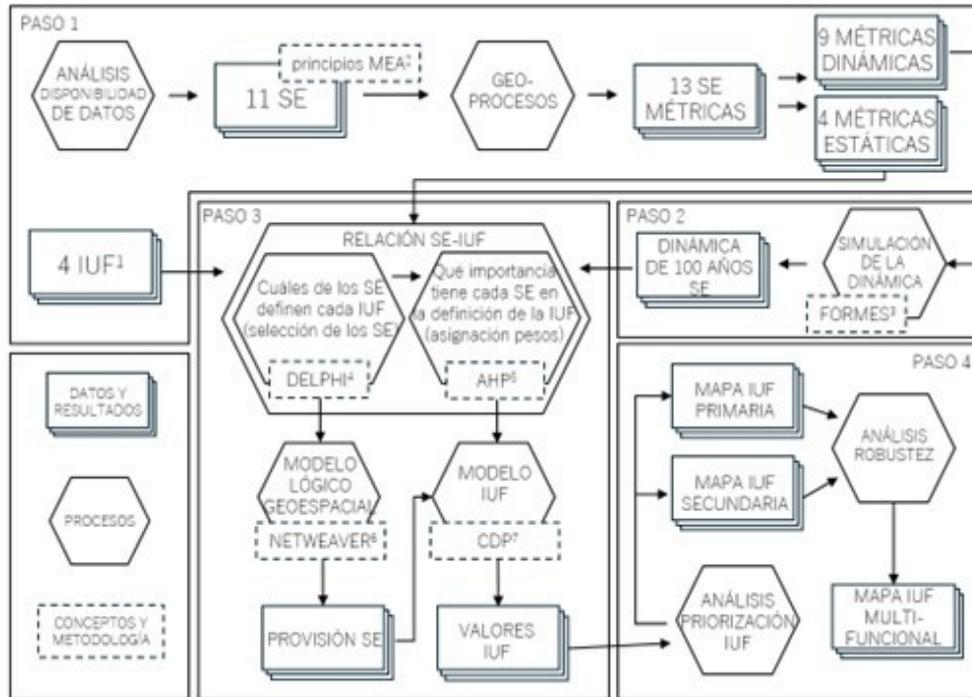


Figura 2. Diseño esquemático del flujo de trabajo del proyecto. MEA: Millennium Ecosystem Assessment, IUF: Idoneidad de Uso Forestal, SE: Servicios Ecosistémicos, FORMES: un sistema de proyección de dinámicas forestales, AHP: Proceso de Jerarquía Analítica, CDP: Criterium Decision Plus.

Paso 1:

El primer paso del análisis de IUF es definir la provisión de SE forestales, que reflejan procesos biofísicos y preocupaciones sociales del entorno forestal. Estos SE se definen mediante conjuntos de datos o métricas clasificadas como:

- Métricas dinámicas: Derivadas de variables biofísicas del bosque (altura, biomasa, diámetro, etc.) y simulables en el tiempo.
- Métricas estáticas: No vinculadas a variables biofísicas, por lo que no pueden extrapolarse temporalmente.

Se seleccionaron 13 métricas para definir 11 SE forestales, priorizando las dinámicas (9 de 13). La definición siguió la metodología de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA). Los indicadores de SE son puntajes compuestos que reflejan la probabilidad de provisión del SE en una parcela: valores altos indican alta probabilidad, y valores bajos, ausencia del SE. Los datos fueron procesados con ArcMap 10.8 para obtener métricas adecuadas para el análisis.

Los servicios de provisión incluyen productos como madera y agua. La provisión de madera se calculó con datos del tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3), mientras que la de agua se estimó utilizando datos del Gobierno de Cataluña. Los servicios de regulación, que incluyen la regulación de procesos como la erosión y los incendios, se evaluaron con seis métricas derivadas del IFN3 y la red Natura 2000, aplicando ecuaciones específicas para estimar riesgos. Finalmente, los servicios culturales, que abarcan beneficios inmateriales como la recreación y la

belleza escénica, se midieron con cuatro métricas basadas en datos de accesibilidad, senderos oficiales, IFN3 y un índice de belleza escénica.

Tabla 1. Métricas seleccionadas para la definición de SE

GRUPO DE SE FORESTALES	SE FORESTALES (MÉTRICAS)	DESCRIPCIÓN DE LA MÉTRICA	TIPO DE MÉTRICA	UNIDAD
SERVICIOS DE PROVISIÓN	Provisión de madera (existencias)	Biomasa de madera: Valor medio del volumen de madera, 100 años	Dinámica	m ³ /ha
Provisión de madera (crecimiento)	Productividad: Diferencia de volumen, año 2100-2000	Dinámica		m ³ /ha
Provisión de agua	Cuerpos de agua: Distancia a flujos y lagos	Estática		metros
SERVICIOS DE REGULACIÓN	Regulación climática (cambio)	Cambio de CO2: Diferencia en existencias, año 2100-2000	Dinámica	t/ha
Regulación climática (existencias)	Almacenamiento de CO2: Valor medio de almacenamiento, 100 años	Dinámica		t/ha
Regulación de la biodiversidad	Índice de diversidad: Índice de Shannon; valor medio, 100 años	Dinámica		Índice
Protección de hábitat	Protección: Red Natura 2000	Estática		Categoría (0/1)
Protección del suelo	Probabilidad de erosión: Valor medio del índice de probabilidad de erosión, 100 años	Dinámica		-
Protección contra disturbios	Incendios: Proporción de árboles muertos en caso de incendio; valor medio, 100 años	Dinámica		-
SERVICIOS CULTURALES	Estética	Belleza escénica: Índice de belleza escénica; valor medio, 100 años	Dinámica	-
Patrimonio natural	Árboles grandes: >70 cm de diámetro; valor medio, 100 años	Dinámica		Número de árboles/ha
Bosques periurbanos	Accesibilidad: Distancia a ciudades >20 000 habitantes	Estática		metros
Recreación	Senderismo: Distancia a senderos homologados	Estática		metros

Paso 2:

La simulación de la dinámica forestal se realizó para proyectar características futuras del bosque y cuantificar la provisión de SE, identificando IUF y estrategias a largo plazo. El periodo de simulación abarcó de 2000 a 2100 en incrementos de 10 años, sin considerar gestión y asumiendo un clima similar al del periodo de referencia (1981-2015).

Se utilizó el sistema FORMES, un modelo modular diseñado para analizar efectos a largo plazo de diferentes estrategias de gestión, incendios y cambios climáticos en la estructura y composición del bosque. FORMES emplea modelos empíricos



sensibles al clima, basados en árboles individuales, para simular crecimiento, mortalidad y regeneración. Estos modelos, independientes de la distancia entre árboles, ofrecen precisión en las simulaciones y son computacionalmente eficientes.

Paso 3:

Establecimos la relación entre los SE y las IUF, cuantificamos la provisión de SE y evaluamos la identificación de IUF mediante un taller participativo basado en el método Delphi. Este enfoque permitió identificar los indicadores de SE más relevantes para describir cada alternativa de IUF. En el taller participaron once investigadores doctorales de disciplinas relacionadas con las ciencias forestales como biología, ciencias ambientales, bioeconomía, ingeniería forestal y geografía, quienes evaluaron el grado de contribución de 13 métricas de SE a cada IUF utilizando una escala Likert de 5 puntos. Se consideraron tanto contribuciones positivas como negativas, con preguntas como: “¿En qué medida la evidencia de recreación contribuye a definir que la IUF primaria es la alternativa social?”.

Tras la primera ronda de evaluaciones, se discutieron los resultados en grupo para aclarar divergencias. Cuando hubo desacuerdo significativo, los participantes justificaron sus decisiones, fomentando un debate deliberativo. Luego, se repitió el cuestionario, identificando las cinco métricas más relevantes para cada FUS. En una segunda fase, se aplicó el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP), que comparó las métricas seleccionadas en pares según su importancia relativa, eliminando indicadores poco significativos y priorizando los más relevantes.

Este análisis permitió obtener ponderaciones que cuantifican la influencia de cada SE en la asignación de IUF. Por ejemplo, la provisión de madera favorece el uso productivo (0.35), mientras que la regulación de biodiversidad apoya el uso conservacionista (0.36). Estas métricas destacan cómo las evidencias de SE pueden guiar la identificación y definición de las alternativas de uso del suelo más adecuadas.

Tabla 2. Pesos de la contribución relativa de las métricas de los Servicios Ecosistémicos Forestales a los beneficios de cada alternativa de Idoneidad de Uso Forestal. (La suma de los pesos de FUS = 1)

Servicio Ecosistémico Forestal (Métricas)	Idoneidad de Uso Forestal			
	Productiva	Protectora	Orientada a la Conservación	Social
Provisión de madera (existencias)		0.24		0.15
Provisión de madera (crecimiento)		0.35		0.09
Provisión de agua		0.16		0.10
Regulación climática (cambio)			0.14	

Regulación climática (existencias)		0.11
Regulación de la biodiversidad	0.09	0.36
Protección de hábitat		0.20
Protección del suelo	0.25	0.12
Protección contra disturbios	0.21	0.37
Estética		0.31
Patrimonio natural	0.16	0.12
Bosques periurbanos		0.24
Recreación		0.23

Una vez seleccionadas las métricas que definen cada FUS, se cuantificó la provisión de Servicios Ecosistémicos (SE) forestales utilizando el modelo lógico NetWeaver, que emplea una medida específica de la fuerza de la evidencia. Los datos de cada métrica se utilizaron para derivar la fuerza de la evidencia, basada en una función de pertenencia difusa que expresa el grado de apoyo a una proposición lógica proporcionado por un valor de datos observado (REYNOLDS et al., 2015). En otras palabras, los valores observados de los datos se transformaron en valores de fuerza de evidencia (que varían de 0, es decir, sin evidencia o sin provisión de SE, a 1, es decir, evidencia completa o provisión total de SE) fijando umbrales que designan el grado de provisión de SE (Figura 3). Los umbrales para las funciones se asignaron en función de los percentiles 10 y 90 de la distribución de datos observados, con varias excepciones en los casos en que este enfoque de percentiles no era aplicable.

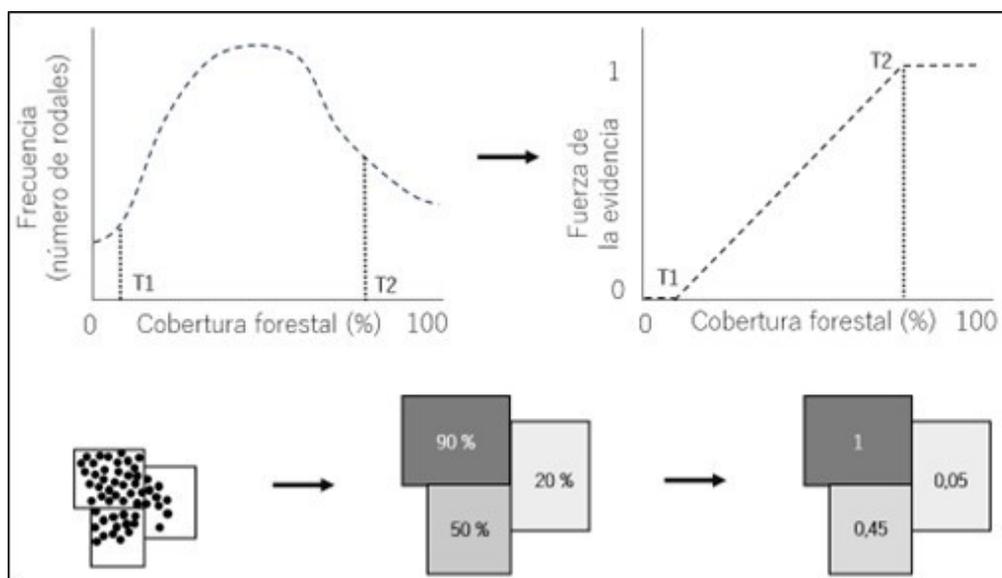


Figura 3. Visualización esquemática simplificada de la conversión de los valores observados originales de cada métrica a valores de fuerza de evidencia.

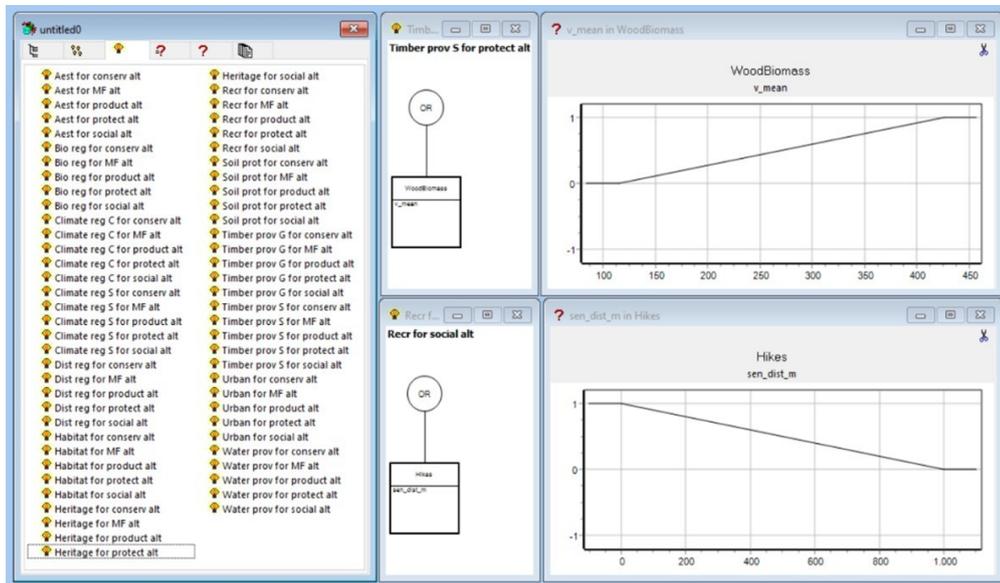


Figura 4. Visualización de los conectores lógicos para evaluar la contribución de la provisión de madera a la idoneidad del uso forestal de tipo protector y de la recreación al IUF social. El marco izquierdo muestra una vista de los componentes de la red, los marcos centrales muestran los detalles de la especificación lógica para las dos alternativas mencionadas. Los marcos derechos presentan dos ejemplos de cómo se definen los argumentos para obtener la medida de la fuerza de evidencia en dos métricas: biomasa de madera y senderismo.

Con los valores de provisión de SE obtenidos, las métricas de SE identificadas y los pesos asignados, se avanzó al último paso de la evaluación de idoneidad de las IUF. El objetivo es calcular la utilidad de las alternativas de IUF con respecto a la provisión de SE, para apoyar la planificación estratégica a largo plazo. Se implementó el modelo Criterium Decision Plus (CDP), basado en el AHP para derivar pesos en los criterios de decisión y utilizando la técnica SMART para normalizar los atributos en puntuaciones de utilidad (de 0 a 1).

Las cuatro IUF fueron evaluadas en cada polígono forestal, y las puntuaciones de cada polígono provienen de los resultados de las 52 redes de NetWeaver. El modelo CDP estima cómo los SE existentes en un polígono respaldan la IUF, proporcionando una medida de idoneidad para guiar el manejo futuro del terreno. Se adaptó la herramienta MCDM en EMDS para aplicar el modelo CDP a cada unidad forestal y obtener las puntuaciones de IUF para cada polígono del área de estudio.

Paso 4:



En el cuarto paso, las puntuaciones de desempeño de las IUF por parcela se ordenaron para crear una jerarquía de alternativas. La IUF con la puntuación más alta fue considerada la opción primaria, mientras que la de menor puntuación fue la menos adecuada. Esto permitió mapear la distribución de las IUF primarias y secundarias en la región e identificar relaciones espaciales entre ellas. También se elaboraron matrices de transición para analizar la frecuencia de asociación entre IUF primarias y secundarias.

Se realizó un análisis de robustez para evaluar la diferencia entre las puntuaciones de las IUF primaria y secundaria. Si la diferencia era menor al 20%, la IUF secundaria se consideraba también adecuada. Cuando la diferencia era mayor, la importancia de la secundaria disminuía. Estas evaluaciones identificaron posibles IUF multifuncionales, clasificadas como "altamente adecuadas" o "adecuadas" según el percentil 10 de la escala de evidencia.

El análisis se llevó a cabo con ArcGIS 10.8 y el complemento EMDS 8.7, disponible en <https://emds.mountain-viewgroup.com/>.

4. Resultados

Los mapas de idoneidad muestran la opción con la puntuación más alta entre las cuatro IUF disponibles. Considerando la dinámica forestal, la provisión de SE y los pesos asignados, la opción más adecuada fue el uso protector, que cubre el 64% de las parcelas, seguida por el productivo (19%), conservacionista (13%) y social (3%). Este patrón se repite en la distribución espacial de las IUF primarias, aunque con densidades variables.

Las cuatro alternativas están presentes en toda el área de estudio, pero las opciones conservacionista y social disminuyen en el noroeste de España, mientras aumentan en la zona central. La alternativa productiva predomina en el norte. Para las IUF secundarias (Figura 6), el patrón es similar, pero con cambios en las frecuencias.

Cada parcela tiene asignada solo una IUF primaria y una secundaria (ver Figuras 5 y 6 para detalles del noreste de España).

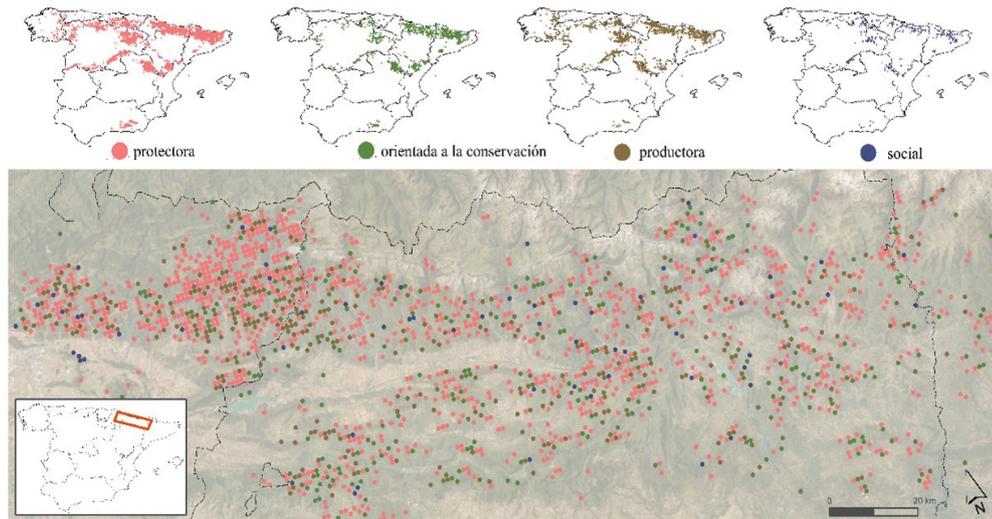


Figura 5. Idoneidad del uso forestal primaria

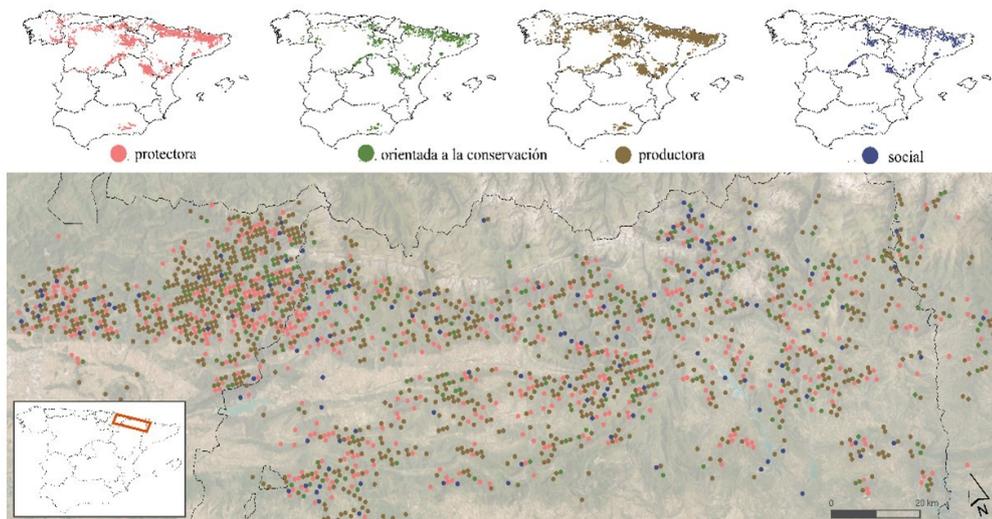


Figura 6. Idoneidad del uso forestal secundaria

El uso productivo es la opción secundaria más común, representando el 59% de los casos, debido a su rol como opción secundaria frente a los usos primarios protector y social (Figura 7). El uso protector secundario tiene una presencia del 24%, siendo la opción secundaria dominante frente a las alternativas productiva y conservacionista. Las alternativas conservacionista (10%) y social (7%) fueron menos frecuentes como IUF secundarias.



Figura 7. Relación entre la Idoneidad de Uso Forestal primaria y secundaria, mostrando la frecuencia de cada alternativa identificada como primaria y secundaria para cada una de las primarias.

Los resultados del análisis de robustez, comparando las IUF primarias y secundarias basadas en una simulación a 100 años, se muestran en la Figura 8. Solo se presentan las parcelas con una diferencia de puntuación dentro del umbral del 20% de la diferencia máxima observada, ya que se consideran potencialmente multifuncionales. Del total de parcelas, el 35% tiene un valor de diferencia inferior al 10% de la diferencia máxima registrada, lo que indica un alto nivel de multifuncionalidad. Además, el 57% de las parcelas están dentro del umbral del 20%, lo que demuestra la significativa presencia de bosques multifuncionales. Especialmente, los bosques con IUF potencialmente multifuncionales están distribuidos proporcionalmente por toda el área de estudio.

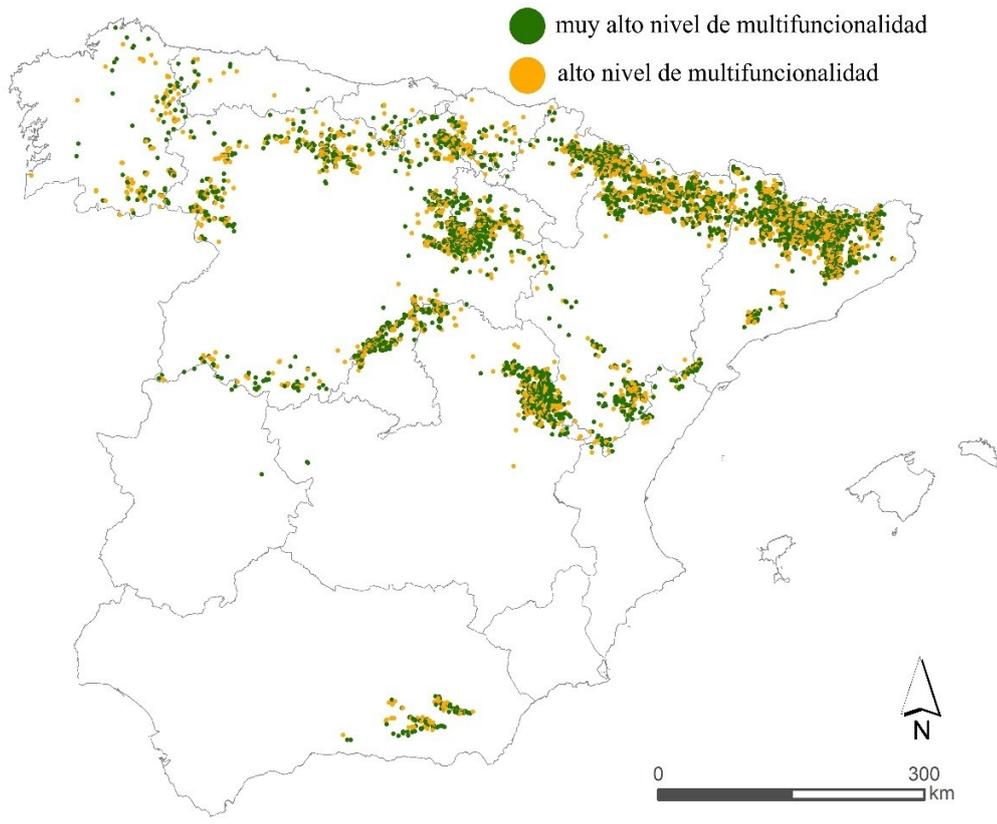


Figura 8. Rodales con el potencial uso multifuncional de la Idoneidad de Uso Forestal aplicando análisis de robustez entre la IUF primaria y secundaria.

5. Discusión

Este estudio propone un enfoque metodológico poco común en la investigación sobre gestión forestal, con el objetivo de superar las limitaciones en la evaluación de los SE y facilitar su integración en procesos de toma de decisiones y estrategias de gestión. La complejidad del concepto de SE forestales presenta desafíos para estudios completos, los cuales se ven aumentados por la diversidad de intereses y objetivos de los actores involucrados, dificultando la mejora de los procesos de toma de decisiones ambientales. Además, la naturaleza dinámica de los SE forestales exige acciones estratégicas de gestión que consideren los cambios en las características del bosque. En este contexto, los procesos de toma de decisiones pueden adaptarse a las condiciones ambientales y mejorar la provisión de servicios, considerando la capacidad de los ecosistemas para generarlos (FISHER et al., 2009; HAUCK et al., 2013).

Aunque hay investigaciones sobre la dinámica forestal y estrategias de gestión, pocos estudios analizan si estas acciones se alinean con los usos más adecuados para cada bosque, incluso si generan valores de SE (LI et al., 2017; NAUDIYAL & SCHMERBECK, 2017; SHIFLEY et al., 2017). La mayoría de los estudios simulan dinámicas forestales y cambios en los SE usando acciones de gestión definidas, pero nosotros hemos adoptado un enfoque diferente (CHUMACHENKO et al., 2003; CONEDERA et al., 2017; DIAZ-BALTEIRO et al., 2017; MAESTRIPIERI et al., 2017; MÜLLER & BURKHARD, 2012). Creemos que la investigación orientada a soluciones



es la manera más efectiva de abordar estos problemas. Los estudios sobre SE suelen centrarse en evaluar la provisión de servicios, pero no siempre ofrecen soluciones prácticas para mejorar la gestión. Definir estrategias de gestión adecuadas puede ayudar a resolver intereses conflictivos y facilitar la toma de decisiones, minimizando conflictos y maximizando los resultados deseados. Por eso, recomendamos la adopción del enfoque de IUF como base para una gestión sostenible de los SE forestales (DAILY et al., 2009).

Las acciones de gestión suelen basarse en objetivos establecidos por los tomadores de decisiones (por ejemplo, propietarios locales, gobiernos) para maximizar la provisión de SE. Sin embargo, estos objetivos no siempre se alinean con la capacidad del bosque para proporcionar los SE deseados. Aunque se logren los objetivos y aumenten los valores de SE, el uso propuesto puede no ser el más adecuado según las características biogeofísicas del bosque, lo que podría comprometer la sostenibilidad de los SE (DÍAZ-YÁÑEZ et al., 2021; URIBE-AGUADO et al., 2022). En este estudio, no consideramos acciones de gestión específicas, sino que nos centramos en estrategias menos influenciadas por intereses inmediatos y más centradas en la capacidad del bosque. Evaluamos las características de los SE para determinar el uso más adecuado, lo cual facilita la elección de acciones de gestión. Utilizando métricas dinámicas en lugar de estáticas, pudimos anticipar características futuras del bosque y definir estrategias a largo plazo. Esta metodología también permite considerar diferentes alternativas de IUF, un aporte importante del enfoque. Integrar escenarios climáticos también puede generar resultados estratégicos más específicos a largo plazo.

Los resultados muestran características heterogéneas de los bosques de *P. sylvestris* en España, con un enfoque en la idoneidad para usos protectores y productivos. Aunque las alternativas de IUF son claras, su interpretación no es sencilla. Es importante tener en cuenta tanto la alternativa primaria como la secundaria de IUF y realizar un análisis de robustez para cada opción. Las implicaciones de gestión varían dependiendo de la diferencia entre las puntuaciones de IUF primaria y secundaria. Si la diferencia es significativa, la alternativa secundaria no requiere mucha consideración. En cambio, si la diferencia es pequeña, la alternativa secundaria podría ser relevante. Este enfoque puede ayudar a identificar características multifuncionales del bosque y a determinar áreas con un IUF multifuncional. Aunque no modelamos el IUF multifuncional ni definimos reglas específicas para ello, identificamos esta opción a través del análisis de robustez.

Además, los patrones de las alternativas de IUF son útiles para identificar usos multifuncionales. Las combinaciones específicas de alternativas de IUF, como productiva primaria-protectora secundaria o protectora primaria-productiva secundaria, pueden dificultar la selección de estrategias de gestión conjuntas. Por lo tanto, es crucial ver los mapas de IUF como alternativas flexibles que puedan ajustarse a circunstancias específicas, en lugar de verlos como resultados fijos. De esta manera, se incrementa la flexibilidad para ajustar la distribución de las alternativas IUF en la región, permitiendo una representación más equilibrada.



Los resultados y sus implicaciones están muy influenciados por las métricas utilizadas para definir cada SE. Por lo tanto, es esencial considerar qué métricas corresponden a cada alternativa de IUF. Además, la contribución de las métricas de ES a las alternativas de IUF se basa en métodos de preferencia, lo que introduce un componente subjetivo. En el estudio participaron investigadores de doctorado con formación académica y motivación, lo que se alineó con los métodos AHP.

La disponibilidad de datos es una de las principales limitaciones de la evaluación de IUF basada en simulaciones. La integración de la dinámica forestal en la evaluación de ES mejora los resultados, pero también presenta limitaciones debido a las restricciones de datos. Validar una evaluación dinámica requiere más métricas dinámicas que estáticas, pero este tipo de análisis depende de simulaciones empíricas que requieren conjuntos de datos específicos. Esto limita la disponibilidad de datos para realizar evaluaciones completas. Los inventarios forestales, que son la principal fuente de datos, suelen ofrecer un rango limitado de variables para una evaluación exhaustiva de los ES. Un enfoque basado en inventarios puede evaluar los ES forestales definidos por métricas relacionadas con las características biogeofísicas del bosque, como la producción de madera o la regulación del clima, pero no es adecuado para evaluar completamente los ES que dependen de características no materiales e intangibles, como los servicios culturales.

Los desafíos relacionados con la cuantificación de los servicios ecosistémicos culturales se ven agravados en este estudio debido a la limitada incorporación de métricas dinámicas en la definición de estos servicios y del IUF social. A diferencia de otras alternativas de IUF definidas con métricas dinámicas, el IUF social depende solo de dos variables dinámicas. Además, la escala geográfica del estudio restringe la distribución espacial de los datos no basados en inventarios disponibles, lo que contribuye a una subrepresentación del IUF social en los resultados del estudio. Por lo tanto, es crucial seleccionar adecuadamente los datos para realizar un análisis completo y obtener resultados objetivos y comparables.

La aplicación del sistema EMDS permitió incorporar exitosamente los resultados del análisis participativo en la evaluación espacial del IUF. Este sistema presenta varias ventajas en análisis espacial multicriterio, satisfaciendo los requisitos necesarios para cumplir con los objetivos del estudio. La aproximación transparente y fácil de usar de EMDS facilita la representación geoespacial de la realidad, ayudando a comprender la complejidad del tema. Además, fomenta la colaboración interactiva entre científicos y usuarios finales, lo que lo hace adecuado para la planificación participativa. EMDS también facilita la integración del conocimiento experto y los métodos científicos, especialmente mediante la ponderación y evaluación de criterios y relaciones de red. En este estudio, los pesos y parámetros se asignaron mediante el proceso participativo, utilizando los datos previamente recolectados.

Aunque todos los procesos de toma de decisiones implican un grado de subjetividad debido a la elección de pesos y parámetros, creemos que la planificación participativa es crucial para reducir sesgos e intereses particulares



en las decisiones, y debe ser implementada en evaluaciones ambientales multicriterio.

6. Conclusiones

Este estudio demuestra la aplicación del sistema EMDS, un marco de apoyo a la toma de decisiones con capacidades espaciales, que facilita la planificación participativa en la toma de decisiones multicriterio. Se incorporaron métricas basadas en simulaciones para evaluar la dinámica de los SE forestales, con el objetivo de definir los usos adecuados del bosque y establecer una base para la gestión a largo plazo. Se abordaron limitaciones metodológicas relacionadas con la gestión forestal y se discutieron las fortalezas y debilidades de las métricas dinámicas. Las alternativas de IUF mostraron patrones espaciales similares, pero variaron en densidad, siendo el IUF protector la opción más frecuente. El nivel de multifuncionalidad fue alto, aunque la compatibilidad entre las alternativas dominantes fue cuestionable. Además, el IUF social estuvo subrepresentado por la distribución desigual de los datos.

Este estudio propone un enfoque para definir el uso forestal más adecuado según las características biogeofísicas, facilitando la selección de acciones de gestión apropiadas. Nos enfocamos en comprender la capacidad de los bosques para proporcionar ES de manera sostenible, en lugar de maximizar los valores de los ES según intereses. Aunque no se ofrecen soluciones definitivas, este enfoque representa un paso importante hacia una gestión forestal más sostenible.

7. Agradecimientos

Agradecemos a Steve Paplanus por su ayuda tecnológica con EMDS, a Philip Murphy por su apoyo con el modelo CDP y a Irina Cristal por su apoyo en la organización de los conjuntos de datos.

8. Bibliografía

- ALBERT, M.; HANSEN, J.; NAGEL, J.; SCHMIDT, M.; SPELLMANN, H.; 2015. Assessing risks and uncertainties in forest dynamics under different management scenarios and climate change. *Forest Ecosystems*, 2(1). <https://doi.org/10.1186/s40663-015-0036-5>
- ANANDA, J.; HERATH, G.; 2009. A critical review of multi-criteria decision making methods with special reference to forest management and planning. *Ecological Economics*, 68(10), 2535–2548. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.05.010>
- CHUMACHENKO, S. I.; KOROTKOV, V. N.; PALENOVA, M. M.; POLITOV, D. V.; 2003. Simulation modelling of long-term stand dynamics at different scenarios of forest management for coniferous - Broad-leaved forests. *Ecological Modelling*, 170(2–3), 345–361. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(03\)00238-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(03)00238-2)
- COLL, L.; GONZÁLEZ-OLABARRIA, J. R.; MOLA-YUDEGO, B.; PUKKALA, T.; MESSIER, C.; 2011. Predicting understory maximum shrubs cover using altitude and overstory basal area in different Mediterranean forests. *European Journal of Forest Research*, 130(1), 55–65. <https://doi.org/10.1007/s10342-010-0395-y>
- CONEDERA, M.; COLOMBAROLI, D.; TINNER, W.; KREBS, P.; WHITLOCK, C.; 2017. Insights about past forest dynamics as a tool for present and future forest management in Switzerland. *Forest Ecology and Management*, 388, 100–112.



- <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.027>
 DADE, M. C.; MITCHELL, M. G. E.; MCALPINE, C. A.; RHODES, J. R.; 2019. Assessing ecosystem service trade-offs and synergies: The need for a more mechanistic approach. *Ambio*, 48(10), 1116–1128. <https://doi.org/10.1007/s13280-018-1127-7>
- DAILY, G. C.; POLASKY, S.; GOLDSTEIN, J.; KAREIVA, P. M.; MOONEY, H. A.; PEJCHAR, L.; RICKETTS, T. H.; SALZMAN, J.; SHALLENBERGER, R.; 2009. Ecosystem services in decision making: Time to deliver. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(1), 21–28. <https://doi.org/10.1890/080025>
- DIAZ-BALTEIRO, L.; ALONSO, R.; MARTÍNEZ-JAÚREGUI, M.; PARDOS, M.; 2017. Selecting the best forest management alternative by aggregating ecosystem services indicators over time: A case study in central Spain. *Ecological Indicators*, 72, 322–329. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.06.025>
- DÍAZ-YÁÑEZ, O.; PUKKALA, T.; PACKALEN, P.; LEXER, M. J.; PELTOLA, H.; 2021. Multi-objective forestry increases the production of ecosystem services. *Forestry*, 94(3), 386–394. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpaa041>
- FISHER, B.; TURNER, R. K.; MORLING, P.; 2009. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 68(3), 643–653. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.09.014>
- HAUCK, J.; GÖRG, C.; VARJOPURO, R.; RATAMÄKI, O.; JAX, K.; 2013. Benefits and limitations of the ecosystem services concept in environmental policy and decision making: Some stakeholder perspectives. *Environmental Science and Policy*, 25, 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2012.08.001>
- 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), 414–427. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2023.09.002>
- LI, T.; CUI, Y.; LIU, A.; 2017. Spatiotemporal dynamic analysis of forest ecosystem services using “big data”: A case study of Anhui province, central-eastern China. *Journal of Cleaner Production*, 142, 589–599. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.118>
- MAESTRIPIERI, N.; HOUET, T.; PAEGELOW, M.; SELLERON, G.; TORO BALBONTÍN, D.; SÁEZ VILLALOBOS, N.; 2017. Dynamic simulation of forest management normative scenarios: the case of timber plantations in the southern Chile. *Futures*, 87, 65–77. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2015.10.013>
- MARTÍN-LÓPEZ, B.; GÓMEZ-BAGGETHUN, E.; GARCÍA-LLORENTE, M.; MONTES, C.; 2014. Trade-offs across value-domains in ecosystem services assessment. *Ecological Indicators*, 37(PART A), 220–228. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.03.003>
- MCDONOUGH, K.; HUTCHINSON, S.; MOORE, T.; HUTCHINSON, J. M. S.; 2017. Analysis of publication trends in ecosystem services research. *Ecosystem Services*, 25, 82–88. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.03.022>
- MÜLLER, F.; BURKHARD, B.; 2012. The indicator side of ecosystem services. *Ecosystem Services*, 1(1), 26–30. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.06.001>
- NAUDIYAL, N.; SCHMERBECK, J.; 2017. The changing Himalayan landscape: pine-oak forest dynamics and the supply of ecosystem services. *Journal of Forestry Research*, 28(3), 431–443. <https://doi.org/10.1007/s11676-016-0338-7>
- REED, P.; BROWN, G.; 2003. Values suitability analysis: A methodology for identifying and integrating public perceptions of ecosystem values in forest planning. *Journal of Environmental Planning and Management*, 46(5), 643–658. <https://doi.org/10.1080/0964056032000138418>
- REYNOLDS, K.; PAPLANUS, S.; MILLER, B.; MURPHY, P.; 2015. Design features behind success of the ecosystem management decision support system and future



- development. *Forests*, 6(1), 27–46. <https://doi.org/10.3390/f6010027>
- SHIFLEY, S. R.; HE, H. S.; LISCHKE, H.; WANG, W. J.; JIN, W.; GUSTAFSON, E. J.; THOMPSON, J. R.; THOMPSON, F. R.; DIJAK, W. D.; YANG, J.; 2017. The past and future of modeling forest dynamics: from growth and yield curves to forest landscape models. *Landscape Ecology*, 32(7), 1307–1325. <https://doi.org/10.1007/s10980-017-0540-9>
- SIYUM, Z. G.; 2020. Tropical dry forest dynamics in the context of climate change: syntheses of drivers, gaps, and management perspectives. *Ecological Processes*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s13717-020-00229-6>
- URIBE-AGUADO, J.; JIMÉNEZ-ARIZA, S. L.; TORRES, M. N.; BERNAL, N. A.; GIRALDO-GONZÁLEZ, M. M.; RODRÍGUEZ, J. P.; 2022. A SUDS Planning Decision Support Tool to Maximize Ecosystem Services. *Sustainability (Switzerland)*, 14(8), 1–22. <https://doi.org/10.3390/su14084560>
- ZANCHI, G.; BRADY, M. V.; 2019. Evaluating the contribution of forest ecosystem services to societal welfare through linking dynamic ecosystem modelling with economic valuation. *Ecosystem Services*, 39(September), 101011. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.101011>