



2022
Lleida

27 · 1
junio · juny
julio · juliol

Cataluña
Catalunya

8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**

8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya · 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales



Organiza

Las plantaciones forestales y los servicios ecosistémicos: un caso práctico en el País Vasco

GONZÁLEZ-SANCHIS, M¹, DEL CAMPO GARCÍA, A¹, PÉREZ ROMERO, J¹, MOLINA A¹, BLANCO, L¹, ONAINDIA A², URIAGEREKA, J³, SALABERRIA, L⁴, ASTORKIZA IKAZURIAGA, I⁵, ALBIAC MURILLO, J⁶, TAPIA, J⁶, GOIENOLA, J⁷, LIDÓN CEREZUELA, A¹, LULL NOGUERA, C¹.

¹ ReForest, Universitat Politècnica de València.

² Basoa Fundazioa.

³ Diputación Foral de Bizkaia.

⁴ Unión de Selvicultores del Sur de Europa (USSE).

⁵ Universidad del País Vasco.

⁶ Universidad de Zaragoza.

⁷ Berriatuko Goikolau Elkarte.

Resumen

Las plantaciones forestales tienen como único objetivo la producción maderera (o pulpa, corcho, etc.), quedando por tanto a la merced de los vaivenes del mercado forestal. Zonas tradicionalmente productoras como el País Vasco, ven ahora amenazado uno de sus modos de vida por cambios socio-económicos que afectan al precio de la madera. Esta amenaza se extiende también a la provisión de servicios ecosistémicos (SE) derivados de las plantaciones forestales. El presente trabajo pretende dotar a esas zonas de una base científica que apoye la gestión forestal de esas zonas mediante la cuantificación de los bienes y servicios derivados de las mismas así como del diseño de un esquema de gestión que los maximice. Para ello cuenta con la confluencia de dos proyectos de investigación, SINCERE H2020 y LIFE RESILIENTFORESTS, mediante los cuales se ha establecido un caso piloto en el municipio de Berriatua, donde se ha instalado una parcela experimental de eco-hidrología. Tras la recogida y el análisis de datos (humedad de suelo, transpiración, etc.), se ha calibrado y validado el modelo de simulación BIOME-BGC_MuSo utilizado en la cuantificación y optimización de SE tales como agua, madera, riesgo de incendio y secuestro de carbono.

Palabras clave

Madera, ecohidrología, servicios adicionales, cuantificación, optimización.

1. Introducción

El sector forestal de Euskadi tiene una importancia notable, tanto en la superficie (55% de suelo forestal, con casi 400.000 ha) como en la actividad socioeconómica, con un 1.53% del PIB vasco y unos 18.000 empleos a tiempo completo, casi 12.000 de forma directa (Albiac Murillo et al., 2016). Según estos autores, las existencias de madera en la región ascienden a $62,6 \times 10^6 \text{ m}^3$ con un crecimiento estimado de $3,4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ y un volumen total extraído de unos $1,2 \times 10^6 \text{ m}^3$. Tanto frondosas como coníferas coexisten a partes casi iguales, con el pino radiata como la especie que más superficie ocupa (33,3%), seguida de hayedos y bosque mixto atlántico (55%). Este impacto socioeconómico es garante de otros servicios y beneficios forestales debido a la gestión forestal, tales como provisión y protección de los recursos hídricos, leña y otros productos forestales no madereros, soporte de la biodiversidad, fijación de carbono o actividades de recreo entre otros.

No obstante de las cifras anteriores, el sector forestal de Euskadi atraviesa una situación preocupante por diversos motivos. Por un lado, la enfermedad de la banda marrón en el pino radiata ha trastocado la actividad forestal en Euskadi, obligando a productores a realizar cortas extraordinarias fuera del itinerario establecido, cortándose pinares desde 15 a 45 años. Por ejemplo, en los años 2019 y 2020 se aceleró el ritmo de cortas a un promedio de 1.000 ha/mes (HAZI, 2020), lo que ha dinamizado temporalmente el empleo forestal y la salida de madera del monte. Los

propietarios sustituyen las plantaciones de pino radiata por otras coníferas como *Cryptomeria japonica* o *Sequoia sempervirens* por ser capaces de desarrollarse sin aparentes problemas sanitarios (al contrario que los pinos) y con una capacidad de crecimiento muy similar al de los pinos. En otras ocasiones, el desánimo, la confusión y los mensajes contradictorios llevan a algunos propietarios al abandono de la gestión de sus montes (HAZI, 2020). Previa a la banda marrón, la situación del mercado de la madera desde la crisis de 2008 y el ciclón Klaus, había ido minando la vitalidad del sector forestal vasco (Tolosana Esteban et al., 2013; Pra et al., 2019). Por último, aunque más sutil, es destacable una creciente desconexión entre los objetivos tradicionales del sector forestal (los productos forestales) y las actitudes de la sociedad civil moderna ante los servicios que el bosque debe proporcionar (Wolfslehner et al., 2016, 2019). Este diagnóstico no es endémico del País Vasco, sino de toda España y Europa, donde el envejecimiento de las masas arboladas se une al abandono de áreas rurales, y es causa de cambios en los regímenes de perturbaciones (plagas, enfermedades y acumulación de combustible y aumento de incendios) (Ruíz-Benito et al., 2013).

La presión de las amenazas climáticas, las comunidades locales y grupos ambientalistas, unido a políticas y esfuerzos internacionales, ha llevado a una mayor necesidad de reconocimiento de los distintos servicios ambientales de los bosques. Así por ejemplo, la Comisión Forestal Europea (Comisión Forestal Europea, 2010) establece que es necesario crear mayor sinergia entre la gestión del agua y del bosque mediante mecanismos institucionales que estén dirigidos a implementar programas de acción regionales y locales. Mas recientemente, la Estrategia de Biodiversidad Europea (2020) insta a los estados miembros a mapear y evaluar el estado de los ecosistemas y servicios ecosistémicos incluyendo una evaluación del valor económico de dichos servicios y su integración en la contabilidad nacional y de la UE (objetivo 2, acción 5). Por tanto, la situación actual señala a un cambio de paradigma significativo, probablemente de la misma magnitud que el experimentado en Bizkaia en la segunda mitad del siglo XX, cuando la economía rural basada en recursos como leñas, carbón, ganadería, minería y agricultura de subsistencia dio paso a la expansión de las plantaciones forestales y, ya en el siglo presente, a la demanda de actividades de ocio, deporte, senderismo, recogida de frutos y plantas silvestres, etc. (Rodríguez, 2006). Hoy en día, el envejecimiento de estas masas arboladas unido al tan marcado abandono de las áreas rurales en España está generando unas masas propicias a plagas, enfermedades y acumulación de combustible, llegando a tener que hacer talas masivas en las actuales plantaciones de *Pinus radiata* y sustituir estas por nuevas especies como el eucalipto (Herrero A & Zavala, 2015). Esto supone hacer un reenfoque, o cuando menos, complementación de los objetivos de la gestión forestal para que los propietarios forestales dirijan sus actuaciones de una manera más multifuncional, es decir, pasar de ver a los bosques como productores de madera a verlos como productores de servicios ecosistémicos y que estos estén compensados con pagos por servicios ambientales (PSA).

Un elemento importante que aparece tanto en el funcionamiento de los ecosistemas forestales como en los servicios ecosistémicos que éstos generan es el agua. El punto de partida para abordar cualquier servicio ecosistémico (SE) relacionado con el agua son los procesos hidrológicos que producen dicho servicio, es decir, la evapotranspiración, la precipitación, el caudal, la percolación, etc. En un ecosistema forestal, estos procesos interactúan y se retroalimentan con otros procesos importantes como la producción primaria, los procesos climáticos, los regímenes de perturbación, los procesos antropogénicos, etc. (Bennett et al. 2009). Comprender y cuantificar este complejo de procesos e interacciones mutuas es crucial en cualquier tipo de gestión forestal cercana a la naturaleza, ya esté más centrada en la provisión de servicios ambientales o en la producción maderera (pulpa, biomasa, corcho, etc). El conocimiento y la gestión de los procesos ecohidrológicos pueden ser de interés para el administrador forestal para cambiar, por ejemplo, la proporción de agua azul a verde o para estimar la eficiencia del uso del agua (acoplando la producción primaria y los procesos hidrológicos). Estos procesos hidrológicos están acoplados a otros (climáticos, edáficos, etc) y por tanto un enfoque de procesos también permite abordar aspectos menos productivos como la producción de sedimentos, la conservación del suelo y los ciclos biogeoquímicos (Bennett et al.

2009). Los diversos procesos son la base de los diferentes SE que podrían incluirse en los esquemas de PSA, por lo que comprender la ecohidrología del sistema permite la gestión de dichos procesos y, por lo tanto, mejorar, producir, cuantificar e incluso optimizar diferentes SE (del Campo et al. 2017). En este sentido, el primer paso debe ser identificar los procesos clave, para luego caracterizarlos, representarlos y gestionarlos.

Sin embargo, lo anterior no está exento de complejidad, pues es necesario engranar esos procesos y además considerar sus diferentes escalas espaciales y temporales. Para ello es preciso el uso de modelos ecohidrológicos basdos en procesos (González-Sanchis et al., 2019). La escala de parcela (unidad espacial básica, píxel o vóxel) permite tener un conocimiento ecohidrológico integrado y detallado del sistema y también es apropiada para probar el efecto de la gestión forestal en el balance de agua. También es la unidad básica para escalar a la ladera o rodal y la cuenca, y además, se puede instrumentalizar experimentalmente produciendo datos reales útiles para la implementación del modelo (calibración y validación) a escalas espacio-temporales cambiantes, que son precisas para proporcionar resultados más significativos y una mejor integración de todo el sistema.

En línea con lo expuesto, el proyecto SINCERE (Spurring Innovations for forest ecosystem services in Europe) recoge estos planteamientos, persiguiendo el desarrollo de políticas novedosas y modelos nuevos de negocio en el ámbito forestal. Uno de sus casos de estudio enmarca el trabajo aquí presentado, y se localiza en Berriatua, País Vaco, España, donde a través de metodologías y protocolos de actuación en una cuenca piloto, con plantaciones de *Pinus radiata*, se busca implementar la provisión, valorización y monitorización de los SE para crear un nuevo marco legal para la silvicultura en la legislación foral de Bizkaia.

2. Objetivos

Los objetivos fundamentales del trabajo son: por un lado, cuantificar de forma precisa los bienes y servicios derivados de las plantaciones forestales más allá de la propia madera, y por otro, ajustar el esquema de gestión para maximizar la provisión de dichos bienes y servicios. Todo ello se realizará mediante la aplicación de la herramienta de soporte a la decisión C.A.F.E. desarrollada en el seno del proyecto LIFE RESILIENTFORESTS. C.A.F.E. combina algoritmos de optimización con modelos basados en procesos tales como BIOME-BGC_MuSo (Hydi, et al, 2016), modelo seleccionado para este caso de estudio. Previo a la aplicación de CAFE, el modelo es calibrado y validado mediante los datos experimentales. Seguidamente, se aplica C.A.F.E. con el fin de optimizar la provisión de SE bajo esquemas de gestión forestal tanto multi como mono objetivo.

3. Metodología

El área de estudio se encuentra en la parte superior de la cuenca del río Artibai en Berriatua, (Bizkaia, España), donde el 72% de la superficie total es bosque de propiedad privada. El 50% del bosque son plantaciones de *Pinus radiata*, el 9% son plantaciones de eucalipto, el 9% corresponde a bosque mixto atlántico y el resto son plantaciones y regeneraciones naturales de diversa índole. Según el Inventario Nacional Forestal de 2016, el País Vasco cuenta con unas 124000 ha de pino regiomontano, lo que representa el 31% de la cubierta forestal total de la región. Sin embargo, estas masas han experimentado un declive en las últimas décadas (Pra et al. 2019; Onaindia Bereziartua, 2020).

Debido a su gran representatividad, para este trabajo se ha escogido una plantación de 23 años de *Pinus radiata* (ver Figura 1). La masa, que fue plantada en 1999 con una densidad inicial (Ni) de 1100 pies/ha, tiene actualmente una densidad de 250 pies/ha, un área basimétrica (G) de 22.1 m²/ha y un diámetro normal (Dn) de 33,5 cm. La zona presenta un clima mesotérmico, con

moderadas temperaturas (T^a media anual 14.4°C) y muy lluvioso (precipitación media anual 1200 mm).



Figura 1. Izquierda: localización de la zona de estudio. Derecha: detalle de la parcela experimental.

El itinerario silvícola aplicado en la plantación tiene un turno de 35 años, un marco de plantación de 3×3 m, repoblado en invierno con una Ni de 1100 pies/ha y con objetivo final de madera gruesa, de alta calidad para muebles y ebanistería, y aprovechamientos intermedios de madera mediana para sierra menuda y de madera pequeña para trituración (Tabla 1).

Tabla 1. Resumen del itinerario actual aplicado en la zona de estudio. Ni: densidad inicial. Nf: densidad final. % extracción: porcentaje de pies/ha extraídos en la intervención.

AÑO	Intervención	Ni (pies/ha)	Nf (pies/ha)	% aprox. Extracción
0	Repoblación	1100	1100	0
4	Desbroce			
8	Desbroce, clareo y poda baja sobre todos los pies	1100	935	15
14	Desbroce y clara	935	608	35
18	Segunda clara sin extracción	608	225	
23	Tercera clara con extracción	225	150	47
35	Corta final	150	0	100

Parcela experimental:

Se estableció en la plantación para monitorizar las variables del continuo suelo-plantatmósfera que permitirán realizar una correcta calibración del modelo (ver Figura 1). La parcela tiene una superficie de 1000 m^2 , una orientación de 246° , una pendiente media del 66% y una altitud de 252 m. Las variables registradas son: humedad y potencial mátrico del suelo (sondador Teros 11 y Teros 21 a 3 profundidades), flujo de savia (método HRM en 4 árboles) y variables meteorológicas con una estación Atmos 41. Además, se han recogido medidas puntuales de índice de área foliar (LAI; $1.5\text{ m}^2/\text{m}^2$) y fracción de cubierta (85 %).

Modelación:

En este trabajo se ha escogido el modelo BIOME-BGC_MuSo (Hydi, et al, 2016), un modelo de base física capaz de reproducir con precisión el ciclo biogeoquímico de cualquier bosque con y sin gestión forestal. Este modelo es el predecesor del conocido BIOME-BGC, uno de los modelos biogeoquímicos más utilizados, cuya reciente evolución a BIOME-BGC_MuSo incluye mejoras estructurales significativas como una capa de suelo múltiple, efecto de la sequía en el funcionamiento de las plantas, y un módulo de gestión forestal, que lo hacen aún más idóneo para este estudio. BIOME-BGC ha sido ampliamente utilizado para simular numerosos ecosistemas forestales generando más de 100 publicaciones (ej., Engstrom et al 2006, Chiesi et al 2007, Schmid et al 2007, Ueyama et al 2010, Eastaugh et al 2011, González-Sanchis et al 2015; García-Prats et al 2018, Puertes et al 2020). Estas publicaciones abarcan desde ecosistemas de bosques boreales hasta semiáridos para representar la dinámica local y/o global del agua, el carbono (C) y el nitrógeno (N), donde el rendimiento del modelo se ha evaluado comparando datos simulados con datos satelitales y/o de campo de los diferentes elementos (agua, C y/o N). El uso del modelo en ecosistemas forestales siempre ha partido de la base de un ecosistema maduro, que se alcanza tras ejecutar el llamado “spin up” en el modelo. Sin embargo, en el presente estudio BIOME-BGC_MuSo se ha utilizado para simular la dinámica forestal desde la plantación de la masa. Para ello, se han modificado los datos de entrada iniciales referentes al C y al N de 0 Kg C/m² a la cantidad inicial de C y N contenidas en la plantación. Dichas cantidades han sido obtenidas a partir de la biomasa de los plantones.

Los datos de entrada necesarios para usar el modelo son: datos meteorológicos diarios de: precipitación temperatura, radiación y déficit de presión de vapor; caracterización del suelo y caracterización de la vegetación. Los datos meteorológicos se han obtenido combinando series temporales de las estaciones meteorológicas de Esukalmet situadas en Berriatúa y Deusto (Bilbao). Los datos de suelo y vegetación han sido manualmente recogidos en la parcela experimental.

La calibración y validación del modelo se ha llevado a cabo mediante la comparación entre series temporales simuladas y observadas de humedad del suelo a 3 profundidades (5, 20 y 45 cm), y series de transpiración. En ambas fases se han empleado períodos de tiempo distintos (ver tabla 2) y los parámetros de ajuste coeficiente de Pearson (*r*) y error cuadrático medio (RMSE). Además, como elementos de evaluación se han utilizado el LAI y el Dn. Para obtener el Dn a partir de las simulaciones se ha empleado la ecuación alométrica para *Pinus radiata* de Moore 2010.

Tabla 2. Relación de variables y períodos de tiempo empleados en las fases de calibración y validación del modelo.

Variables	Calibración	Validación
Humedad de suelo a 5 cm	19/01/2021-27/08/2021	28/08/2021-31/12/2021
Humedad de suelo a 20 cm		
Humedad de suelo a 45 cm		
Transpiración		
LAI	-	Dato puntual
Dn	-	Dato puntual

Cuantificación y optimización: C.A.F.E.

Una vez calibrado y validado el modelo, se procede a cuantificar la provisión de SE derivados de la gestión forestal actual (ver el itinerario silvícola de la tabla 1), y posteriormente, a optimizar dicha provisión mediante el uso de la herramienta C.A.F.E. La herramienta combina la simulación dinámica eco-hidrológica con la optimización multiobjetivo (basada en el cálculo de la frontera de Pareto), de forma que el usuario puede realizar gestión forestal atendiendo a más de un producto a la vez, así como decidir la relevancia de cada uno de esos objetivos/productos, y si hay alguno que predomina sobre el resto. Los productos/objetivos de gestión se agrupan en: los relativos al C (ej: captación de CO₂, producción de biomasa, respiración del suelo, etc.), al Agua (ej: percolación, escorrentía, caudal, etc.), al Fuego (ej: riesgo de incendio, propagación, etc.) y a la Eco-resiliencia (ej: eficiencia en el uso

del agua, tolerancia a la sequía, etc.), conformando el acrónimo C.A.F.E. Para ello, la herramienta incluye los modelos de simulación eco-hidrológica TETIS-VEG, RHESSys y BIOME-BGC_MuSo, siendo este último el empleado para el presente estudio. El diseño de la gestión forestal consiste en dar respuesta a las siguientes cuestiones: ¿dónde gestiono?, ¿cuánto?, ¿cómo? y/o ¿cuándo hago la siguiente gestión? de forma que se optimicen los objetivos/productos seleccionados.

C.A.F.E. es capaz de trabajar en diferentes regiones climáticas, gracias a la calibración de la simulación eco-hidrológica para cada caso en concreto. Además, permite modificar la escala de trabajo e ir desde la parcela hasta la cuenca, integrando una unidad biofísica robusta. El resultado es un conjunto de posibles soluciones sobre las que el planificador y el gestor pueden decidir y ejecutar (ver Figura 4).

Cuantificación inicial:

Para realizar la cuantificación inicial de provisión de SE se han generado tres series climáticas sintéticas a partir de la serie original mediante el programa ClimGen. Seguidamente se ha simulado cada una de las series sintéticas para posteriormente promediar los resultados de cada una de las variables a cuantificar obtenidas en cada simulación. Las variables consideradas son: i) para el grupo del C: biomasa, madera y C en el suelo; ii) para el grupo del Agua: percolación y escorrentía superficial; iii) para el grupo del Fuego: humedad superficial del suelo; iv) para el grupo de la Eco-resiliencia: eficiencia en el uso del agua.

Optimización: mono y multi objetivo:

La gestión forestal diseñada con C.A.F.E. consiste en un turno de 30 años, durante los cuales se plantean las siguientes variables de decisión: densidad de plantación, intervalo de tiempo entre intervenciones e intensidad de cada intervención. En este caso las preguntas relativas a donde gestionar no se han utilizado ya que el modelo empleado no es espacialmente distribuido. Los objetivos a optimizar son: maximizar la producción de madera (grupo C), maximizar la percolación (grupo A), maximizar la humedad superficial del suelo (grupo F) y maximizar la eficiencia en el uso del agua (grupo E). Dichas preguntas se han resuelto atendiendo a los objetivos por separado (mono objetivo) así como todos a la vez (multi objetivo). El número total de intervenciones además de la corta final (a los 30 años) viene prefijado por el usuario. Para este caso de estudio se ha lanzado la herramienta para optimizar tanto de forma conjunta como individualmente cada uno de los objetivos mencionados anteriormente con 2, 3 y 4 intervenciones además de la corta final, sumando un total de 15 aplicaciones de C.A.F.E. Dado que la optimización se basa en el cálculo de la frontera de Pareto, las soluciones generadas dentro de cada aplicación de C.A.F.E. son igual de válidas entre sí, y es el usuario el que debe decidir cuál es la más apropiada. Para ello, C.A.F.E. incluye a modo orientativo una columna informativa a cerca de los costes potenciales de operación (€/ha), que aunque no considera el coste de plantación ni forme parte de la optimización, sí puede ayudar a tomar la decisión.

4. Resultados

En general, la calibración y validación del modelo arroja unos coeficientes de ajuste que avalan su uso. Concretamente, para la humedad del suelo, las tres profundidades presentan un r de Pearson por encima de 0.5, y un RMSE inferior a 0.1 cm/cm. El resultado en la transpiración, aunque satisfactorio, es significativamente inferior al de la humedad del suelo, con r entre 0.47 y 0.54, y RMSE de 0.28 a 0.33 (ver tabla 3 y figuras 2 y 3).

Tabla 3. Resultados de la calibración y validación del modelo. HS: humedad del suelo expresada en cm/cm. La transpiración está expresada en mm/día. RMSE: error medio cuadrático. PEARSON: coeficiente de correlación de Pearson con un intervalo de confianza del 95%.

Fase	Parámetro	HS a 5cm	HS a 20cm	HS a 45cm	Transpiración
Calibración	Pearson	0.83	0.70	0.79	0.47
	RMSE	0.03	0.02	0.03	0.33
Validación	Pearson	0.78	0.85	0.84	0.54
	RMSE	0.02	0.03	0.06	0.28

Tabla 4. Índice de Área Foliar (LAI) y Diámetro normal (Dn) simulados y observados para el día 20/01/2021.

Variable	Observado	Simulado
LAI (m2/m2)	1,5	1,8
Dn (cm)	33,5	34.0

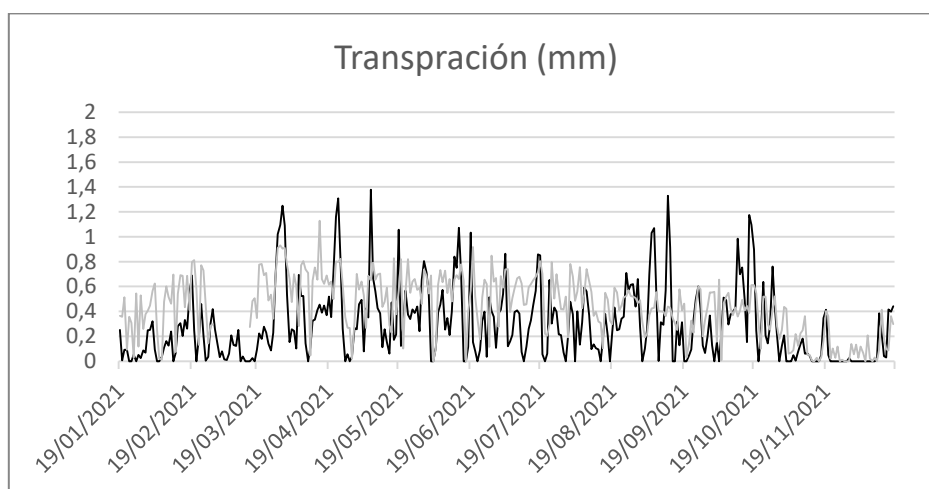


Figura 2. Transpiración observada (gris) y simulada (negro) durante los períodos de calibración y validación.

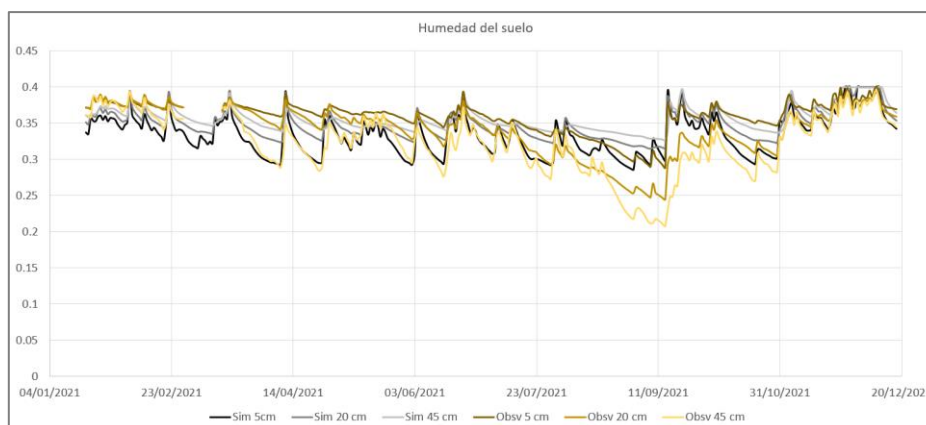


Figura 3. Humedad del suelo simulada (grises) y observada (ocres) a 5, 20 y 45 cm de profundidad durante los períodos de calibración y validación.

Cuantificación y optimización: CAFE

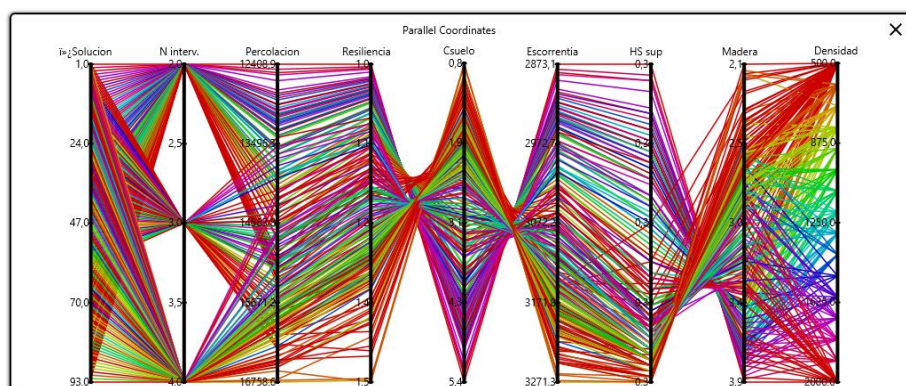
La cuantificación de la provisión de SE derivados de la gestión actual muestra que además de producción de madera, la gestión forestal proporciona aproximadamente 0.15 hm³ de agua (percolación y escorrentía) por ha gestionada. Además, almacena alrededor de 14 T C/ha, mantiene una humedad de suelo superficial elevada durante todo el periodo reduciendo así el riesgo de

incendio, e incrementa la eficiencia en el uso del agua respecto de esa misma situación sin gestión forestal (ver tabla 5).

Tabla 5. Cuantificación de los SE en los diferentes escenarios de gestión forestal. En cursiva se señalan las variables introducidas como objetivos a maximizar en la herramienta C.A.F.E. En el escenario inicial ("Inicial") y en el multiobjetivo ("CAFE") se presentan la media y la desviación típica de los resultados obtenidos. R_WUE: eficiencia en el uso del agua, expresada como ratio respecto de la situación de no gestión (superior a 1 significa que la gestión incrementa el WUE). N. interv: número de intervenciones antes de la corta final. D. plantac: densidad de plantación. HS: humedad superficial del suelo. Csuelo: Carbono del suelo. Resil: resiliencia.

Objtv.	N interv.	D. plantac. (pie/ha)	Carbono (Kg C/m ²)		Agua (mm)		Fuego (cm/cm)	Resil.
			Madera	Csuelo	Percolación	Escorrentía	HS sup	R_WUE
C	Inicial	1100	3.4 ± 0.1	1.4 ± 0.3	11800.7 ± 100.2	3418.7 ± 21.4	0.33 ± 0.00	1.1 ± 0.1
	2	2000	3.6	5.4	12220.1	2861.8	0.33	0.9
	3	1200	3.3	3.3	14547.9	3058.9	0.33	1.1
	4	1500	2.9	3.2	14287.9	3048.3	0.33	1.2
A	2	500	2.1	1.6	15245.5	3148.2	0.33	1.3
	3	600	2.2	1.3	15992.9	3209.7	0.33	1.3
	4	1100	2.1	3.2	16462.6	3325.1	0.33	1.4
F	2	500	2.8	2.6	14854.5	3098.9	0.34	1.1
	3	500	2.3	1.4	15800.4	3190.7	0.34	1.2
	4	600	2.2	1.0	16442.5	3244.6	0.34	1.4
E	2	500	2.2	2.0	14847.9	3112.4	0.33	1.2
	3	500	2.0	1.2	15101.2	3137.5	0.33	1.3
	4	600	2.0	0.9	16106.4	3224.0	0.33	1.4
CAFE	2	1100 ± 500	3.4 ± 0.4	3.7 ± 1.0	13866.8 ± 884.7	3003.1 ± 81.4	0.33 ± 0.00	1.1 ± 0.1
	3	1100 ± 500	3.1 ± 0.4	2.7 ± 1.0	15040.9 ± 809.3	3106.9 ± 76.5	0.33 ± 0.00	1.2 ± 0.1
	4	1000 ± 500	2.7 ± 0.3	2.0 ± 0.7	15771.7 ± 561.5	3173.6 ± 54.1	0.34 ± 0.00	1.3 ± 0.1

A pesar de que el itinerario silvícola actual proporciona claros beneficios, la optimización con C.A.F.E. muestra que éstos pueden incluso mejorar en función del objetivo de gestión planteado (ver tabla 5). Cuando planteamos una gestión forestal mono objetivo basada en la madera, vemos que variaciones en el itinerario silvícola (número de intervenciones y densidad de plantación) generan resultados muy distintos, siendo el más productivo el que corresponde a 3 intervenciones (cortas del 20, 70 y 80 % de la masa a los 4, 15 y 26 años desde la plantación, respectivamente) y una densidad de plantación de 2000 pies/ha. Sin embargo, si el objetivo es la producción de agua, el itinerario que maximiza dicha provisión consiste en 4 intervenciones (cortas del 80, 60, 80 y 80 % de la masa a los 4, 9, 16 y 20 años desde la plantación, respectivamente) y una densidad de plantación de 1100 pies/ha. Si la finalidad es el incremento de la resiliencia climática, C.A.F.E. sugiere densidades de plantación mucho más bajas (600 pies/ha) y 4 intervenciones (cortas del 80, 60, 70 y 60 % de la masa a los 4, 8, 13 y 17 años desde la plantación, respectivamente). Finalmente, si lo que se busca es mantener una humedad de suelo superficial elevada para disminuir el riesgo de incendio, C.A.F.E. sugiere de nuevo disminuir la densidad de plantación (500-600 pies/ha) y realizar también 4 intervenciones, aunque de distinta intensidad (cortas del 50, 70, 80 y 80 % de la masa a los 4, 10, 16 y 23 años desde la plantación, respectivamente).



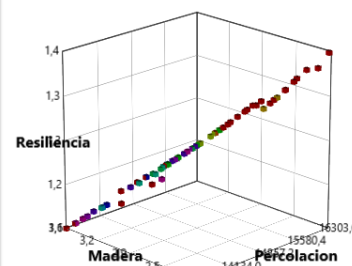
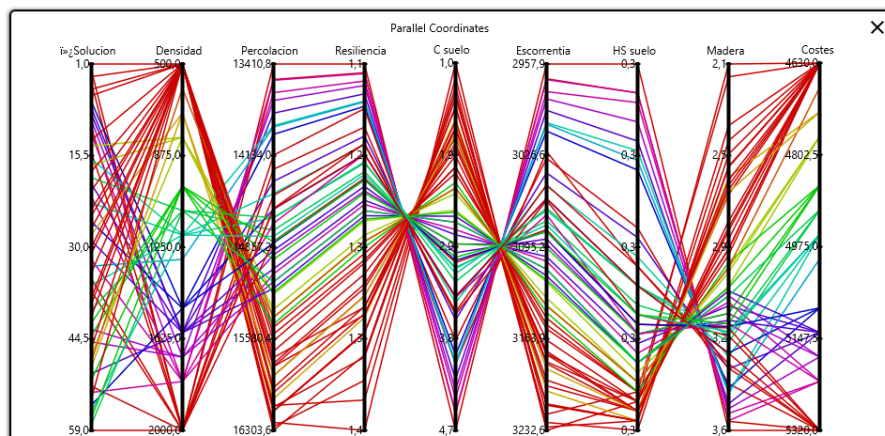


Figura 6: Conjunto de soluciones de la optimización de la gestión forestal multiobjetivo para 3 intervenciones antes de la corta final.

Cuando aumentamos el número de intervenciones a 3 vemos que a pesar de barajar el mismo rango de densidad de plantación que en el caso anterior (500-2000 pies/ha), los resultados no alcanzan la misma producción de madera (2.1-3.6 Kg C/m²) (ver figura 6 y tabla 5). Sin embargo, la producción de agua sí incrementa, con una percolación que va de 13410.8 a 16303.6 mm, es decir, casi 1000 mm más que en el caso anterior. La máxima producción de madera se genera con la plantación de mayor densidad, mayores costes (5320 €/ha) y menor producción hídrica (16369 mm).

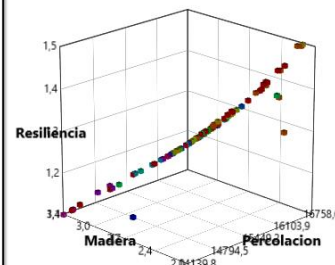
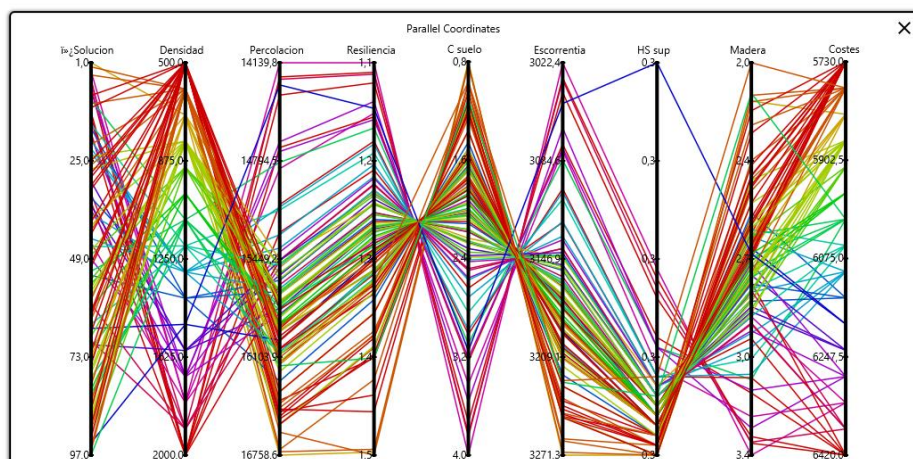


Figura 7: Conjunto de soluciones de la optimización de la gestión forestal multiobjetivo para 4 intervenciones antes de la corta final.

La gestión diseñada con 4 intervenciones propone el mismo rango de densidades que las otras dos alternativas, pero produce más agua (14139.8-16758.6 mm de percolación) y menos madera (2.0-3.4 Kg C/m²) (ver figura 7 y tabla 5). La resiliencia y los costes potenciales de operación también son significativamente más altos que en los anteriores casos, y de nuevo, la solución que más madera produce es también la de mayor densidad de plantación (2000 pies/ha), menor cantidad de agua genera (17162.2 mm) y menor resiliencia presenta (1.1).

5. Discusión

El ajuste obtenido entre simulado y observado es muy similar al obtenido en la gran mayoría de trabajos en los que se ha utilizado tanto BIOME-BGC_MuSo como su predecesor BIOME-BGC (e.j. Engstrom et al 2006, Chiesi et al 2007, Schmid et al 2007, Ueyama et al 2010, Eastaugh et al 2011,

González-Sanchis et al 2015; García-Prats et al 2018, Puertes et al 2020). No obstante, el presente trabajo incluye una complejidad al comenzar la simulación desde el momento de la plantación, y no a partir de que esta alcanza un estado estacionario como es habitual cuando se emplea este modelo. Li et al 2013 muestra una experiencia similar en la que se simuló desde el año siguiente a la plantación las especies *Acacia mangium*, *Schima superba* y *Pinus elliottii* con BIOME-BGC. En este caso, el modelo fue validado con series temporales anuales de biomasa y materia orgánica del suelo, y los estadísticos de ajuste que se presentan tan sólo reflejan la existencia o no de diferencias estadísticamente significativas entre simulado y observado, lo cual no refleja del todo el comportamiento y ajuste del modelo. En este sentido, el presente estudio sería uno de los primeros en mostrar las capacidades de BIOME-BGC_MuSo en simular plantaciones forestales desde el inicio, contrastadas además con series temporales de alta resolución (diaria) y que aúnan varios flujos, en concreto agua y C.

A pesar de que el producto principal de estas plantaciones es la madera, la cuantificación de otros SE tales como el agua o el C del suelo destacan el papel multifuncional que pueden tener estas zonas. En cuanto al agua, estas plantaciones situadas en zonas de cabecera aportan gran cantidad a las áreas más bajas de la cuenca donde habitualmente se sitúa la población. Por ello, la gestión de las mismas puede tener una influencia directa en la reserva hídrica destinada al consumo humano. Puede que, en estos momentos, en una zona como Berriatua con una precipitación media anual de 1200 mm, ese aporte de agua no resulte relevante, pero si miramos a las proyecciones climáticas, tanto el RCP 4.5, 6.0 como el 8.5 que auguran un descenso de las precipitaciones y un incremento de las temperaturas (ver figura 7), puede que la percepción respecto a la necesidad de considerar el agua cuando se elige itinerario silvícola cambie. Además, si pensamos en el diseño de un esquema de PSA, la cifra de 0.15 hm³/ha de agua que se deriva de la gestión de las plantaciones pueden suponer un beneficio de unos 25500 €/ha, considerando el precio medio del agua a 0.17 €/m³ (González-Sanchis et al 2019).

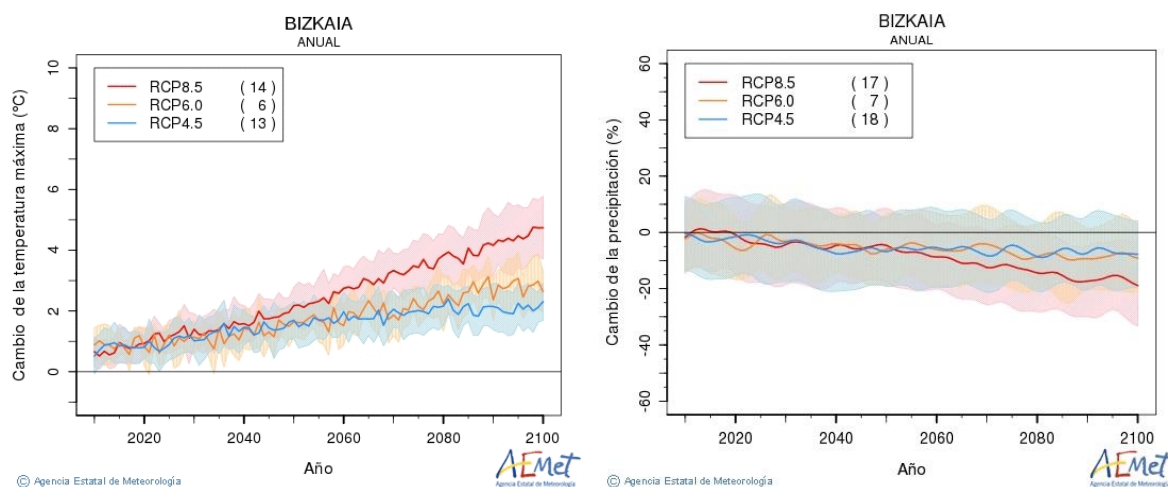


Figura 8: Proyección de Temperatura y precipitación bajo los escenarios de Cambio Climático RCP 4.5, 6.0 y 8.5 en Bizkaia. Fuente AEMET.

De igual forma, en el caso del C (en suelo y vuelo) y la resiliencia climática de la masa, al verse también afectados por la gestión forestal, su cuantificación puede ayudar a orientar la misma, y por supuesto, a ponerla en valor. De acuerdo con los resultados de la simulación, el itinerario silvícola común puede fijar unas 48 t C/ha entre el suelo (sin contar con las raíces) y la madera, cantidad nada desdeñable ante el proceso de descarbonización que parece que la UE quiere iniciar. Comparando este valor con estudios empíricos como por ejemplo el de Grierson et al 1992, observamos de nuevo que los resultados del modelo se ajustan a la realidad.

La gestión forestal también parece incrementar la resiliencia climática, entendida como la eficiencia en el uso del agua, al compararla con la de la misma masa sin gestionar. Este dato puede

ser de gran interés para el propietario forestal ya que además de las proyecciones de cambio climático anteriormente mencionadas, estas masas están actualmente padeciendo enfermedades como la de la banda marrón, lo que supone importantes pérdidas económicas y daños severos al ecosistema forestal.

En cuanto al riesgo de incendio, el método de cálculo empleado no parece reflejar un efecto significativo de la gestión forestal. Es cierto que no es una zona con un riesgo meteorológico de incendio elevado como puedan ser algunas zonas del Levante, pero probablemente la gestión forestal tenga más efectos en el comportamiento del fuego que los analizados en este trabajo. Aunque no se ha podido incluir en la simulación por ser BIOME-BGC_MuSo un modelo mono específico, la presencia de helechos en el sotobosque de la plantación es un factor clave en la generación y propagación de incendios en estas zonas, y su gestión resulta por tanto esencial en términos de prevención. En este sentido, puede que la implementación de otro de los modelos que tiene acoplados C.A.F.E., RHESsys, mejore los resultados al incluir la posibilidad de simular este sotobosque.

Al combinar los cuatro elementos (C, agua, fuego y eso-resiliencia) en C.A.F.E., se observa un cierto antagonismo entre algunos de ellos, como por ejemplo entre el agua y la madera. Altas densidades de plantación producen mayores cantidades de madera, pero menores de agua. De igual forma, a mayor número de intervenciones, se obtiene menor cantidad de madera y más agua. La resiliencia y la producción de madera también presentan un comportamiento algo antagónico, aunque éste no parece significativo, ya que la resiliencia de la masa gestionada siempre supera la de la misma masa sin gestionar. La combinación de objetivos puede resultar algo confusa para el gestor forestal, pero resulta necesaria si se quieren adaptar las plantaciones al escenario de cambio global. Atender tan sólo a un SE (madera, pulpa, corcho, etc), vincula de forma exclusiva la plantación a un mercado concreto, dejándolo a merced de la volatilidad del mismo. Si por el contrario la gestión se diseña combinando varios SE, se diversifican las oportunidades de mercado y con ello, los beneficios potenciales. Además, si en esta gestión multiobjetivo se consideran SE como la provisión de agua y la resiliencia climática, se contribuye a diseñar plantaciones probablemente más acordes con el escenario de cambio climático. No obstante, si a la hora de diseñar el esquema de plantación y gestión, la combinación de SE resulta demasiado confusa, al menos convendría realizar la cuantificación de los mismos, ya que otorga la oportunidad al gestor forestal de abrir el campo de mercado más allá de la madera (pulpa, corcho, etc.). Si bien es cierto que actualmente no existe mercado real para muchos de los SE considerados (agua, fuego y/o resiliencia climática), tanto su cuantificación como la optimización multi objetivo, contribuyen a poner de manifiesto la necesidad de crearlos mediante esquemas de PSA.

6. Conclusiones

Los resultados obtenidos en la validación del modelo basado en procesos BIOME-BGC_MuSo ponen de manifiesto su capacidad para simular plantaciones forestales desde el inicio de las mismas y no sólo a partir de alcanzar la madurez.

La cuantificación de SE como agua, fijación de C y resiliencia climática pone en valor las plantaciones forestales y su gestión. Dicha cuantificación revela el papel de las plantaciones como grandes contribuyentes de agua y potenciales zonas de descarbonización, cuya gestión, al incrementar la resiliencia climática de la masa, parece que ayudará a mantener este papel ante el escenario climático futuro.

Por el contrario, el papel de la gestión forestal en el riesgo de incendio tal y como se ha abordado en este trabajo, no parece tan relevante, por lo que sería necesario o bien mejorar C.A.F.E. o bien utilizarlo con RHESsys en vez de BIOME-BGC_MuSo, ya que permitiría la simulación del sotobosque.

En general se observa un comportamiento antagónico entre la producción de madera y la provisión de agua (escorrentía y percolación), de forma que incrementando la densidad de plantación y disminuyendo el número de intervenciones se produce más madera por m², mientras que bajas densidades y mayor número de intervenciones generan más cantidad de agua.

El diseño de la gestión forestal combinando variables de los cuatro grandes grupos (C, agua, fuego y eco-resiliencia) pone de manifiesto la complejidad del proceso. De la misma forma, se evidencia la necesidad de considerar SE derivados de al menos tres de los cuatro grandes grupos (agua, C y eco-resiliencia) si se quiere alcanzar cierto equilibrio entre los mismos, así como si se quiere diseñar una gestión forestal que mire hacia el clima futuro.

La cuantificación y/o la optimización multi objetivo de SE contribuyen a poner de manifiesto la necesidad de crear esquemas de PSA.

7. Agradecimientos

Este estudio ha sido posible gracias a la Subdirección General de Gestión de Espacios Naturales y Servicios Generales de la Diputación Foral de Bizkaia PAÍS VASCO a través del encargo del estudio “Quantification of goods and services derived from forest management in Berriatua (Biscay)” a la Universitat Politècnica de Valencia, mediante el proyecto H2020 SINCERE. El proyecto LIFE RESILIENT-FORESTS (LIFE17 CCA/ES/000063) ha contribuido con la aplicación de C.A.F.E. Además, los proyectos de investigación: Cehyrfo-Med (CGL2017-86839-C3-2-R) financiado por MCIN/AEI /10.13039/501100011033/ y por FEDER Una manera de hacer Europa, SilvAdapt.net (RED2018-102719-T) financiada por MCIN/AEI /10.13039/501100011033 y han contribuido al desarrollo de este trabajo. Los autores agradecen también a Basoa Fundazioa, Asociación cultural Goikolau de Berriatua y a Pertike por el apoyo prestado.

8. Bibliografía

ALBIAC MURILLO, J., ASTORKIZA IKAZURIAGA, I., EGUÍA PEÑA, B., FERRERO RODRÍGUEZ, A.M., MORENO DÍAZ, J., JUAN RAMÓN MURUA MÚGICA (coord.) 2016. Libro blanco del sector de la madera, actividad forestal e industria de transformación de la madera: evolución reciente y perspectivas en Euskadi. Edit. Gobierno Vasco, Servicio Central de Publicaciones. España.

CHIESI, M., MASELLI, F., MORIONDO, M., FIBBI, L., BINDI, M., & RUNNING, S. W. (2007). Application of BIOME-BGC to simulate Mediterranean forest processes. *Ecological Modelling*, 206(1-2), 179-190.

EASTAUGH, C. S., PÖTZELSBERGER, E., & HASENAUER, H. (2011). Assessing the impacts of climate change and nitrogen deposition on Norway spruce (*Picea abies* L. Karst) growth in Austria with BIOME-BGC. *Tree Physiology*, 31(3), 262-274.

ENGSTROM, R., HOPE, A., KWON, H., HARAZONO, Y., MANO, M., & OECHEL, W. (2006). Modeling evapotranspiration in Arctic coastal plain ecosystems using a modified BIOME-BGC model. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 111(G2).

GARCIA-PRAT

GONZÁLEZ-SANCHIS, M., DEL CAMPO, A. D., & MOLINA, A. J. (2015). Modeling adaptive forest management of a semi-arid Mediterranean Aleppo pine plantation. *Ecological Modelling*, 308, 34-44.

GRIERSON, P. F., ADAMS, M. A., & ATTIWILL, P. M. (1992). Estimates of carbon storage in the aboveground biomass of victorias forests. *Australian Journal of Botany*, 40(5), 631-640.

HAZI. (2020). Informe de HAZI Fundazioa sobre el Inventario forestal del País Vasco-2020. El bosque vasco en cifras 2020.

HIDY, D., BARCZA, Z., MARJANOVIĆ, H., OSTROGOVIĆ SEVER, M. Z., DOBOR, L., GELYBÓ, G., ... & NAGY, Z. (2016). Terrestrial ecosystem process model Biome-BGCMuSo v4. 0: summary of improvements and new modeling possibilities. *Geoscientific Model Development*, 9(12), 4405-4437.

LI, L., LU, H., TILLEY, D. R., REN, H., & SHEN, W. (2013). The maximum empower principle: an invisible hand controlling the self-organizing development of forest plantations in south China. *Ecological indicators*, 29, 278-292.

MOORE, J. R. (2010). Allometric equations to predict the total above-ground biomass of radiata pine trees. *Annals of Forest Science*, 67(8), 806.

PUERTES, C., GONZÁLEZ-SANCHIS, M., LIDÓN, A., BAUTISTA, I., DEL CAMPO, A. D., LULL, C., & FRANCÉS, F. (2020). Improving the modelling and understanding of carbon-nitrogen-water interactions in a semiarid Mediterranean oak forest. *Ecological Modelling*, 420, 108976.

RUIZ-BENITO, P., HERRERO, A., ZAVALA, M.A. 2013. Vulnerabilidad de los bosques españoles frente al Cambio Climático: evaluación mediante modelos. *Ecosistemas* 22(3):21-28. Doi.: 10.7818/ECOS.2013.22-3.04.

GARCÍA-PRATS, A., GONZÁLEZ-SANCHIS, M., DEL CAMPO, A. D., & LULL, C. (2018). Hydrology-oriented forest management trade-offs. A modeling framework coupling field data, simulation results and Bayesian Networks. *Science of the Total Environment*, 639, 725-741.

SCHMID, S., ZIERL, B., & BUGMANN, H. (2006). Analyzing the carbon dynamics of central European forests: comparison of Biome-BGC simulations with measurements. *Regional Environmental Change*, 6(4), 167-180.

TATARINOV, F. A., & CIENCIALA, E. (2006). Application of BIOME-BGC model to managed forests: 1. Sensitivity analysis. *Forest Ecology and Management*, 237(1-3), 267-279.

TOLOSANA ESTEBAN, E., ALBIZU URIONABARRENETXEA, P.M., VIGNOTE PEÑA, S., 2013. Situación del mercado de madera de calidad de pino radiata. Influencia en el estado de sus masas. Análisis de alternativas de gestión. En SECF (ed.) Sexto Congreso Forestal Español, Vitoria-Gasteiz 10-14 junio 2013. 6CFE01-577

UEYAMA, M., ICHII, K., HIRATA, R., TAKAGI, K., ASANUMA, J., MACHIMURA, T., ... & HIRANO, T. (2010). Simulating carbon and water cycles of larch forests in East Asia by the BIOME-BGC model with AsiaFlux data. *Biogeosciences*, 7(3), 959-977.

WOLFSLEHNER, B., PROKOFIEVA, I. AND MAVSAR, R. (editors). 2019. Non-wood forest products in Europe: Seeing the forest around the trees. What Science Can Tell Us 10. European Forest Institute.

WOLFSLEHNER, B., STEFANIE LINSE, S., PULZL, H., BASTRUP-BIRK, A., CAMIA, A., AND MARCHETTI, M., 2016. Forest bioeconomy – a new scope for sustainability indicators. From Science to Policy 4. European Forest Institute.