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 - 950

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

Sociedad Española de Ciencias Forestales SECF

# Cuantificación y optimización de la gestión forestal sostenible y multiobjetivo: LIFE RESILIENT FORESTS

PÉREZ ROMERO, J.[1], GONZÁLEZ SANCHIS, M.[1], DEL CAMPO GARCÍA, A.[1], BART, R[2], ORTIZ MIRANDA, D[3], HURTADO, C[3], FRANCÉS GARCÍA, F[4], GARCÍA-PRATS, A[4], ESCRGI, A[5], MOCE, P[6], MOLINA HERRERA, A[1], BLANCO CANO, L[1].

[1] Universitat Politècnica de València. ETS Ingeniería Agronómica y del Medio Natural. Dep. Ing. Hidráulica y Medio Ambiente.
[2] Sierra Nevada Research Institute, UC Merced, California, USA
[3] Universitat Politècnica de València. Departamento de Economía y Ciencias Sociales.
[4] IIAMA- Universidad Politècnica de València.
[5] Consorcio Provincial de Bomberos de Valencia.
[6] Ayuntamiento de Serra.

## Resumen

El papel de los bosques en la provisión de bienes y servicios (B&S) es ampliamente reconocido (C, agua, biodiversidad, paisaje, etc.). Por el contrario, la importancia de la gestión forestal en dicha provisión no incluye a muchos de los B&S, centrándose fundamentalmente en aquellos que actualmente se consideran económicamente rentables. La cuantificación de la provisión de B&S ayudaría no sólo a poner en valor el papel de la gestión forestal, sino que también contribuiría a diseñar modelos de gestión más sostenibles que incluyan múltiples objetivos tales como, los mencionados. El presente trabajo muestra la experiencia del proyecto RESILIENTFORESTS, que ha desarrollado una herramienta de apoyo a la decisión para la gestión forestal sostenible y multiobjetivo (CAFE). La aplicación de CAFE para resolver un caso real en el monte público del municipio de Serra (Valencia) muestra, por un lado, el alcance en provisión de B&S del monte semi-árido, y por otro, la necesidad de considerar ciertos antagonismos entre los mismos a la hora de diseñar la gestión forestal. Concretamente se vio que la gestión disminuye el riesgo medio de incendio (2%), incrementa la biodiversidad estructural (14%) y la resiliencia climática (7.6%), pero reduce ligeramente el secuestro de C (aunque lo protege) y resulta neutra en la provisión de agua.

## Palabras clave

Bienes y servicios, Gestión forestal, Sistema de Soporte a la Decisión, Optimización multiobjetivo.

## 1. Introducción

Los ecosistemas forestales proporcionan servicios ecológicos, económicos y sociales, entre los que se incluyen el mantenimiento de la biodiversidad, el suministro de alimentos, medicinas y productos forestales, la regulación del ciclo hidrológico, la protección del suelo o los usos recreativos (Bonan, 2008). Para potenciar esta multifuncionalidad de los bosques, es necesaria una gestión forestal adecuada de sus recursos naturales que garantice la sostenibilidad de las masas. Además, dicha gestión permite también mejorar el rendimiento de las masas e incrementar su resistencia a las perturbaciones. Históricamente, los ecosistemas forestales europeos han tenido un papel principalmente productivo y, por tanto, se han gestionado mirando hacia esta productividad, en su mayoría maderera. Esto hace que bosques como los del Mediterráneo semi-árido sean concebidos como poco productivos, y resulten por tanto abandonados o simplemente carentes de gestión. Este enfoque ha ido cambiando poco a poco con el tiempo, hasta llegar a la actualidad, en la que se empieza a reconocer el papel multifuncional de los bosques mediante la combinación de múltiples bienes y servicios (B&S) ecológicos, económicos y sociales. Con este cambio se incrementa también la complejidad de la gestión forestal, la sostenibilidad de la misma y se destaca su papel como elemento regulador de la provisión de esos B&S. Además, si se consideran aquí las previsiones climáticas, la aplicación de este tipo de gestión se hace aún más necesaria (Bravo et al., 2017).

Para prevenir y mitigar las amenazas derivadas del cambio global que pueden sufrir en general los bosques, la gestión forestal multifuncional juega un papel clave, siendo éste especialmente relevante en masas actualmente consideradas como poco productivas. Esto es lo que se pretende conseguir con el proyecto RESILIENTFORESTS, un proyecto cofinanciado por el programa LIFE de la Unión Europea para promover la gestión forestal a escala de cuenca de forma que se mejore la resiliencia del bosque a los incendios forestales, la escasez de agua, la degradación ambiental y otros efectos inducidos por el cambio climático. Combinando agua, fuego, resiliencia climática con producción de biomasa generada por la gestión forestal, se puede valorar y cuantificar los B&S derivados de actuaciones selvícolas y de este modo, fomentar la gestión forestal en área de baja productividad. Para alcanzar dicha meta, el proyecto ha desarrollado un sistema de soporte a la decisión (DSS) llamado C.A.F.E. que permite cuantificar y optimizar dichos B&S derivados de la gestión forestal.

Los DSS pueden definirse y adoptar muchas formas diferentes, pero a lo largo de los años han evolucionado hasta convertirse en un software interactivo y flexible que permite a los gestores tomar decisiones acertadas de gestión y planificación cuando se enfrentan a un problema mal estructurado, o simplemente no estructurado, mediante la interacción directa con los datos y los modelos de análisis (Rauscher et al., 2000). En los ecosistemas naturales se dan multitud de procesos complejos que dificultan la toma de decisiones por parte del gestor. Además, para lograr una gestión sostenible de los ecosistemas, es necesario comprender los aspectos socio-ecológicos que intervienen en los procesos de los mismos (Ananda y Herath, 2009). Los planificadores y gestores forestales, en una gran mayoría, toman decisiones de gestión basadas en su conocimiento empírico, considerando múltiples factores específicos y subjetivos que no son factibles de cuantificar ni modelar fácilmente, lo que puede generar errores cuando se desarrollan planes a largo plazo y dependen de la experiencia adquirida en el corto plazo (Stewart et al., 2013), por ello el uso de las herramientas como CAFE van dirigidas a mejorar las prácticas actuales en la toma de decisiones que requiere una gestión forestal sostenible.

Debido al gran número de procesos complejos que tienen lugar en los ecosistemas, la importancia de estas herramientas en la gestión forestal ha llevado a un amplio y variado uso en el sector. Por ello, se han desarrollado numerosos DSS en el campo de la gestión forestal, que consideran una diversa gama de bienes, servicios y aspectos relacionados con la gestión ambiental, como la fauna silvestre (Garcia y Armbruster, 1997), el riesgo de incendios o perturbaciones (Noble y Paveglio, 2020), la gestión del paisaje (Jahani y Rayegani, 2020), la consideración de las restricciones del cambio climático (Cristal et al., 2019) o las incertidumbres en la operación logística (Maldonado et al., 2019). Además, existen DSS multiobjetivo que permiten entender cómo interactúan estos múltiples objetivos y qué soluciones son las más óptimas. Dada la multifuncionalidad y complejidad de los ecosistemas forestales, este enfoque es necesario para gestionar un bosque de forma que se cuantifiquen y se maximicen los B&S derivados de la gestión del bosque.

El aprovechamiento de las posibilidades que ofrecen los DSS en el logro de los objetivos de la gestión forestal sostenible depende de su nivel de adopción e implementación por los encargados directos de la gestión y por los responsables de la política forestal (Stewart el at.,2013). A su vez el nivel de implementación de los DSS depende de su nivel de utilidad en las tareas de gestión y planificación (Pastorella et al., 2015). Por lo cual, la participación de los diferentes actores relacionados con la gestión forestal es indispensable en los procesos de diseño, calibración y puesta en marcha de la DSS. Para el caso de Serra presentado aquí, varios ejercicios participativos se han desarrollado para evaluar el nivel de utilidad del DSS CAFE y facilitar un proceso participativo en la toma de decisiones de la gestión forestal.

## 2. Objetivos

El presente trabajo pretende utilizar la herramienta del proyecto RESILIENTFORESTS para obtener la cuantificación y optimización de los servicios ecosistémicos derivados de la gestión forestal en los rodales de actuación del término municipal de Serra (Valencia, España). Para lograr dicho objetivo se va ejecutar la herramienta CAFE y se van a analizar diversos criterios de optimización.

## 3. Metodología

### 3.1. Área de estudio

La zona de estudio (Fig. 1) está situada en pleno Parque Natural de la Sierra Calderona, dentro del término municipal de Serra (Valencia, España). Es una zona montañosa situada en la costa mediterránea con una altitud que oscila entre los 250 y los 800 msnm, y presenta un clima típicamente mediterráneo con una temperatura media anual de 17 °C (entre los años 1960-2007), una evapotranspiración potencial anual de 837 mm entre los años 1960-1990 según Thornthwaite (1948), y una media muy irregular precipitaciones anuales que oscilan entre los 350 y los 600 mm (entre los años 1960-2007), con intensas tormentas otoñales y veranos secos. Sin embargo, durante los últimos 17 años, la precipitación registrada es de 300 ± 76 mm. El clima se clasifica como mediterráneo semiárido según el índice de aridez de De Martonne (DE MARTONNE, 1926) o (Thornthwaite, 1948). Los suelos son generalmente poco profundos (aproximadamente 30-60 cm de profundidad) donde las calizas, dolomías y margas ocupan la mayor parte del territorio. El área está ocupada principalmente por *Pinus halepensis* Mill. (Pino carrasco) junto con matorral, aunque también es posible encontrar algún claro de bosque de *Quercus ilex* sbsp. ballota, *Quercus suber* y *Pinus pinaster*. Del mismo modo, existen algunos campos agrícolas de secano dispersos, que han sido progresivamente abandonados.

La zona concreta tiene un área de 2982 ha en la que se ubican los 36 rodales de actuación con una superficie total de 248 ha, sobre la que se va a aplicar gestión forestal por medio de claras (Fig. 1).

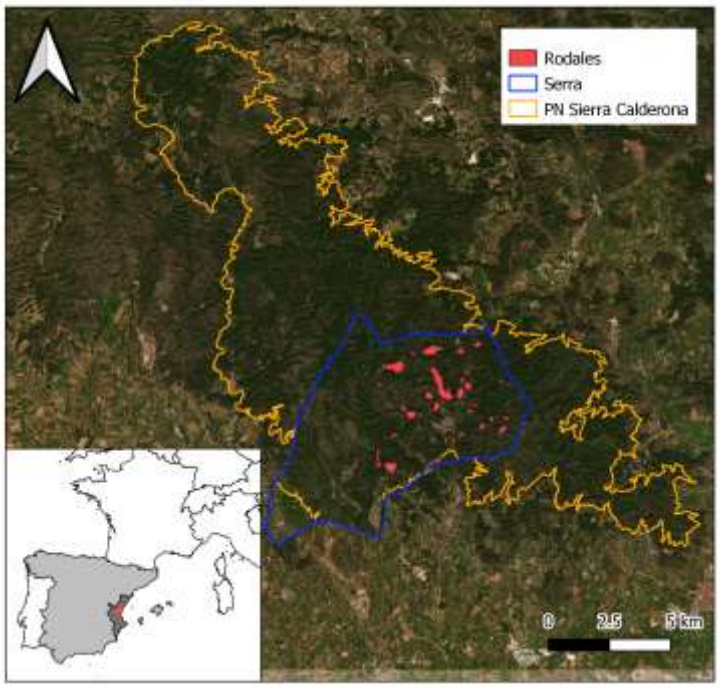


*Figura 1. Mapa de situación.*

### 3.2. CAFÉ

C.A.F.E. (Carbono, Agua, Fuego y Eco-resiliencia) es un Sistema de Apoyo a la Decisión Multi-Objetivo (MODSS) para la gestión forestal. Esta herramienta determina las actividades selvícolas óptimas para gestionar múltiples productos, bienes y servicios como la producción de biomasa, el secuestro de carbono, el riesgo de incendios, el aprovisionamiento de agua, la resiliencia climática o la biodiversidad estructural, que se cuantifican simultáneamente en el tiempo y el espacio para una solución seleccionada. Para ello, CAFE combina la simulación ecohidrológica y la optimización multiobjetivo con algoritmos evolutivos. Además, finaliza la ejecución con una visualización interactiva de los resultados que permite al usuario comprender y seleccionar la opción más adecuada. Por tanto, los tres bloques en los que se estructura este DSS son: simulación, optimización y visualización (Fig. 2). La combinación y comunicación de estos bloques lo convierten en una herramienta polivalente y útil para la toma de decisiones de los gestores forestales.

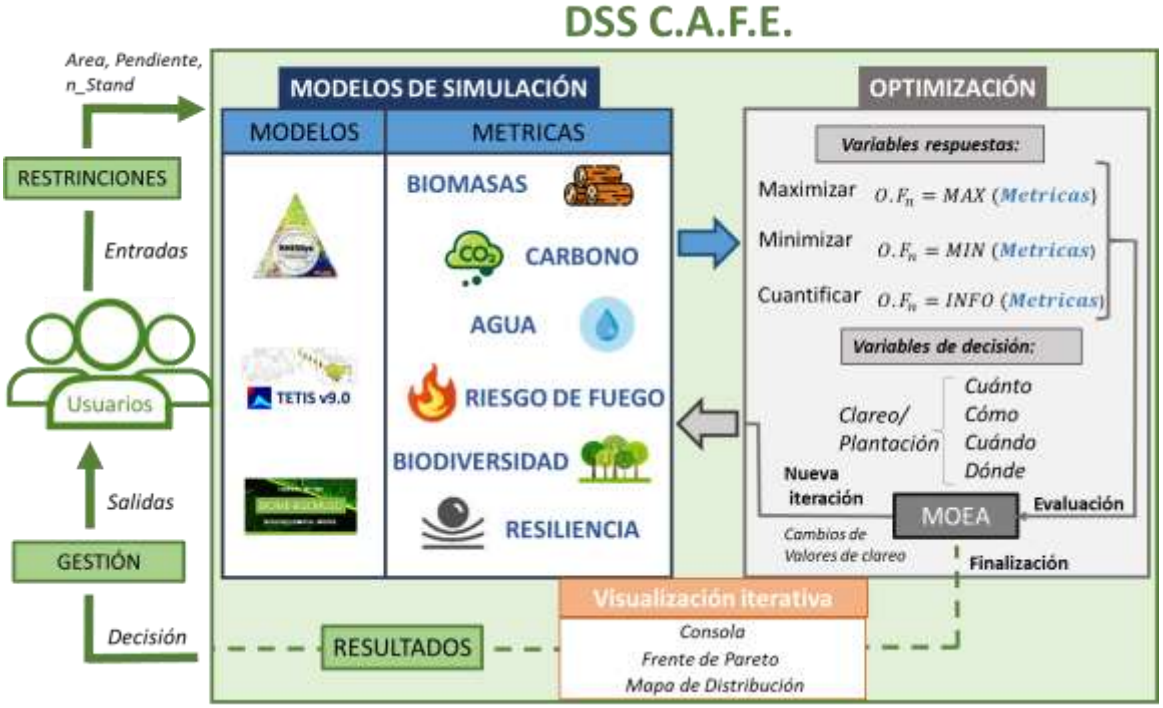


*Figura 2. Esquema de sistema de soporte de decisión (DSS) CAFE.*

## Bloque 1: Simulación

Este grupo lo componen los modelos basados en procesos (PBM), también conocidos como modelos mecanísticos o de ecosistemas, que son la representación matemática del funcionamiento de un sistema biológico bien definido (Tanevski et al., 2017). Estos modelos representan y simulan procesos fisiológicos y biogeoquímicos y sus interacciones con el medio ambiente. Suelen consistir en un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales que definen la esencia de cada proceso (patrones temporales de parámetros clave), así como sus entradas y salidas, basándose en los primeros principios (PBM genérico) o, en su defecto, en el conocimiento empírico (PBM descriptivo) (Jorgensen, 2011; Wiegert, 1975).

En definitiva, reproducen las relaciones funcionales causa-efecto, que están estructuradas dentro de una compleja jerarquía de procesos a diferentes niveles de importancia dentro de un sistema. Dado que los ecosistemas forestales se caracterizan por numerosas interacciones y retroalimentaciones entre la vegetación, el suelo y la atmósfera, la capacidad de los PBM para realizar predicciones realistas depende de una integración lógica de los flujos de materia y energía (Bradshaw y Sykes, 2014). Los procesos que tienen lugar en el ecosistema pueden dividirse en 3

bloques: vegetación, suelo y atmósfera. En cada una de ellas suceden múltiples secuencias interconectadas que permiten que los bosques sigan existiendo. La parte de la vegetación es la más identificada con el ecosistema, pero sin la parte del suelo y la atmósfera no se podría cerrar el ciclo. Ya que, para poder seguir existiendo la vegetación se necesitan muchos recursos que son proporcionados por los otros grupos, como es el agua (Morales et al., 2005).

Los PBM pueden ser espacialmente distribuidos o no distribuidos. Los distribuidos son capaces de diferenciar los procesos que ocurren en un área determinada por las características del terreno o de la vegetación, y pueden trabajar a nivel de colina (o píxel) o de cuenca. Mientras que los modelos no distribuidos hacen una representación puntual y promediada de las características del terreno y trabajan a nivel de parcela (Fig. 3). Dentro de este bloque, la herramienta cuenta con 4 modelos de simulación basados en procesos. Siendo 2 distribuidos (Rhessys y Tetis-Veg) y 2 no distribuidos (Biome-Bgc y CLM). Ambos tipos se han implementado para satisfacer las diferentes necesidades de los gestores. Pueden simular un bosque entero o sólo una parcela experimental. Los modelos distribuidos pueden ser interesantes cuando el área de trabajo es heterogénea, o cuando se quiere diferenciar espacialmente lo que ocurre con los procesos que se simulan. Si se quiere caracterizar un rodal homogéneo o un área de producción, se pueden ejecutar los no distribuidos y tener un valor de escala de parcela que sea representativo de su área total. Además, los modelos distribuidos también son capaces de trabajar como los no distribuidos, siendo por tanto aplicables a todos los casos.

-RHESSys es un modelo eco-hidrológico diseñado para simular el ciclo y el transporte integrados de agua, carbono y nitrógeno en un terreno espacialmente variable. El modelo está estructurado como una representación del paisaje jerárquica y espacialmente anidada, con una serie de procesos hidrológicos, microclimáticos y ecosistémicos asociados a objetos específicos del mismo en diferentes niveles de la jerarquía. Este enfoque está diseñado para facilitar el análisis ambiental que requiere una comprensión de los procesos dentro de la cuenca, así como los flujos agregados de agua, carbono y nitrógeno. RHESSys se ha aplicado en una variedad de tipos de ecosistemas, incluyendo regiones boscosas de coníferas caducifolias y praderas, ecosistemas de tipo alpino y mediterráneo, y zonas urbanas (Tague y Band, 2004).

-Tetis-Veg se compone de dos módulos principales: el módulo hidrológico TETIS y el módulo de vegetación HORAS. Se trata de un modelo conceptual distribuido; representa la cuenca como una retícula de celdas interconectadas según la configuración topográfica derivada de un modelo digital de elevaciones (MDE). El modelo incorpora adecuadamente la variabilidad espacial de los ciclos hidrológicos y el crecimiento de la vegetación. Su base conceptual se basa en el estado actual de la técnica y cumple el principio de parsimonia, es decir, se selecciona el modelo con el menor número de parámetros para obtener prestaciones similares. El módulo TETIS es un modelo de simulación hidrológica y del ciclo de los sedimentos distribuido espacialmente mediante la subdivisión de la cuenca en celdas regulares con parámetros de base física (Francés et al., 2007).

-Biome-BGC_MuSo es un modelo de procesos ecosistémicos que estima el almacenamiento y el flujo de carbono, nitrógeno y agua. Biome-BGC_MuSo es un programa informático que estima los flujos y el almacenamiento de energía, agua, carbono y nitrógeno para los componentes de la vegetación y el suelo de los ecosistemas terrestres. Lo llamamos modelo de procesos porque sus algoritmos representan los procesos físicos y biológicos que controlan los flujos de energía y masa (Hydi, et al, 2016).

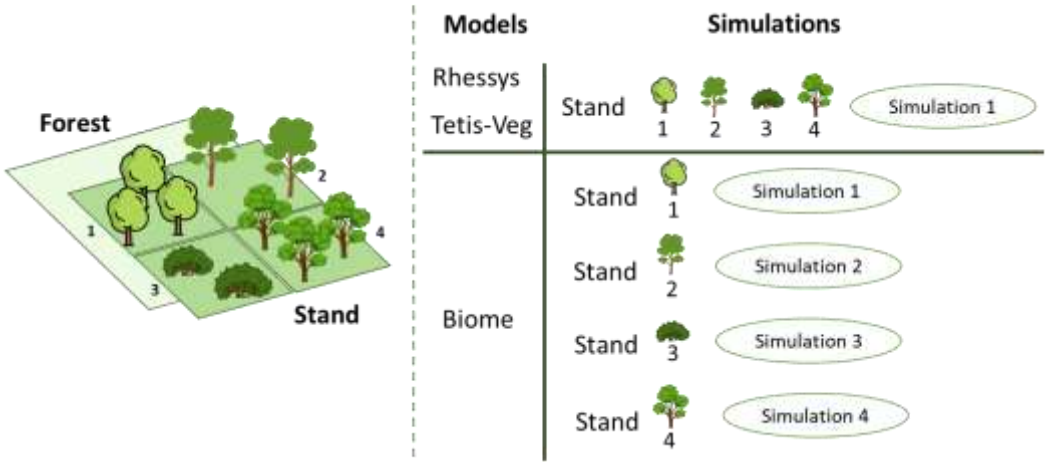


*Figura 3. Diferencia entre modelos de simulación distribuidos y no distribuidos.*

Las métricas que esta herramienta proporciona a los usuarios (Tabla 1) pueden agruparse en los siguientes bloques: Biomasa extraída, carbono secuestrado, incremento de agua, reducción del riesgo de incendio, biodiversidad estructural y resiliencia forestal. Para obtener estas variables, es necesario evaluar el ciclo del agua y del carbono que proporcionan los modelos. Dado que la herramienta no está cerrada, se están incluyendo nuevas métricas y se está evaluando el comportamiento de los valores calculados con datos de campo.

*Tabla 1. Métricas calculadas para cuantificar y optimizar.*

| Métricas | Descripción | Unidades | Modelo |
|---|---|---|---|
| Extracción de biomasa | Es la suma de todos los rodales a los que se aplica la diferencia de carbono entre el día anterior al clareo y el posterior al mismo, repitiéndose como tantas intervenciones se realicen a lo largo de la simulación. | $Kg/m^2$ | Todos |
| Secuestro de carbono | Métrica calculada por los modelos que se promedia a lo largo del periodo de simulación. | $Kg/m^2$ | Rhessys Biome |
| Respiración del suelo | Métrica calculada por los modelos que se promedia a lo largo del periodo de simulación. | $Kg/m^2$ | Rhessys Biome |
| Percolación | Métrica calculada por los modelos que se suma los totales anuales para el periodo de simulación y se divide por los años de simulación. | mm | Todos |
| Agua azul | Métrica calculada por los modelos a partir de la suma total de todo el periodo de simulación. | mm | Todos |
| Agua circulante | Métrica calculada por los modelos a partir de la suma total de todo el periodo de simulación. | $Hm^3$ | Todos |
| KBDI | Es el valor medio del KBDI (índice de riesgo de incendio) para el periodo de simulación. | adimensional | Rhessys |
| Biodiversidad Estructural | Es la suma de diferentes valores estructurales del rodal como la densidad, el número de estratos, los diámetros, la madera muerta en el suelo y en el vuelo y, finalmente, el hueco en el rodal. | adimensional | Rhessys |
| Resiliencia | Es el valor medio de los valores medios anuales de la relación entre el agua utilizada por la planta y el crecimiento de la madera, en comparación con la situación de partida. | adimensional | Rhessys Biome |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Mejora de Situación | Es la suma del valor categórico proporcionado a cada una de las métricas que superan los valores con actuación forestal a la situación de referencia. | adimensional | Todos |

Bloque 2: Optimización

Un problema de optimización multiobjetivo (MOP) implica una serie de funciones objetivo que deben minimizarse o maximizarse, sujetas a una serie de restricciones y límites variables. A menudo, los objetivos entran en conflicto entre sí, ya que la mejora de uno de ellos puede provocar el deterioro de otro. Por tanto, no existe una solución única que pueda optimizar todos los objetivos simultáneamente. En su lugar, las mejores soluciones de compromiso, denominadas soluciones óptimas de Pareto, son importantes para un responsable de la toma de decisiones (DM). Estas soluciones son los puntos que se encuentran en el frente de no dominación, donde, por definición, no llegan a ser dominados por ningún otro punto del espacio objetivo; de ahí que sean el Frente Pareto-óptimo (FP). Es característico que no exista una solución única, sino que se pueda identificar un conjunto de soluciones matemáticamente igual de buenas. Debido a su naturaleza poblacional, los algoritmos evolutivos multiobjetivo (MOEA) son capaces de aproximar todo el FP de un MOP en una sola ejecución y es uno de los métodos de optimización heurística más utilizados en la investigación en los últimos 20 años (Deb, 2015; Zhou et al., 2011).

Para crear el módulo de optimización con MOEA en CAFE, se ha utilizado la biblioteca Rhodium de código abierto de Python, que permite la toma de decisiones robusta (RDM), la toma de decisiones robusta multiobjetivo (MORDM) y la modelización exploratoria. Estos marcos de apoyo a la toma de decisiones permiten identificar estrategias robustas para la gestión de sistemas ambientales complejos, evaluando las compensaciones entre las estrategias candidatas y caracterizando sus vulnerabilidades (Hadjimichael et al., 2020).

Los MOEA tratan de optimizar o cuantificar las variables formuladas matemáticamente (métricas) en CAFE. Dichas métricas son consideradas como las funciones objetivo (OF), que se obtienen a partir de las operaciones con las salidas de los modelos de simulación. A los MOEA, hay que decirles si cada una de las OF debe ser maximizada, minimizada o solo cuantificada. Otro apartado importante de estos algoritmos son las variables de decisión, que son las variables sobre las que la optimización tiene que proporcionar sus valores adecuados para optimizar las OF. En CAFE hay hasta 4 variables de decisión sobre la clara que se quiere aplicar (¿Dónde?, ¿Cuándo?, ¿Cómo? o ¿Cuánto?) y una sobre la densidad inicial de plantación (¿Cuánto?), que hacen referencia al tipo de gestión forestal que se debe de aplicar. Se pueden utilizar todas o sólo algunas de ellas. Por último, se encuentran las restricciones, que son los límites que tiene la optimización sobre las variables de decisión o los OF. En este caso, la herramienta ha implementado por el momento la restricción de pendiente (limitando la intensidad de clara en pendientes elevadas), número de rodales o superficie máxima sobre la que actuar.

Bloque 3: Visualización interactiva

El último módulo implementado en CAFE es la parte de visualización interactiva. Se divide en tres partes, consola, gráficos iterativos y mapas de distribución de claras. La primera es donde se muestran los valores de cada iteración (Métrica-Actuaciones), y donde la optimización propone los valores de las variables de decisión *("¿Dónde?, ¿cuándo?, ¿Cuánto?, ¿Cómo?"*), se aplican los cambios propuestos sobre la vegetación, y se lanza la simulación. Terminada cada simulación, se calculan las métricas a cuantificar u optimizar, según la selección del usuario para cada una de ellas (cada una puede ser seleccionada como Maximizar, Minimizar o Info). El valor obtenido en cada una de las métricas (FO) es evaluado por el algoritmo, decide si almacena la solución o la descarta, y pasa a la siguiente iteración realizando cambios en las variables de decisión para repetir el proceso hasta que el MOEA encuentra la FP. Cuando esto sucede, se pasa a la segunda parte, que son los gráficos iterativos donde el usuario puede visualizar los resultados obtenidos y filtrar las soluciones por los

criterios que considere. Aquí puede ver la tabla con los valores de las métricas, la frontera de Pareto y el cubo 3D. Una vez que termine de seleccionar la solución que prefiere el usuario, la tercera parte se abre, dejando visualizar el mapa de distribución de clara, siempre que el caso de estudio utilice los modelos de simulación distribuidos (Fig. 4). Además, incorpora acceso a la aplicación J3 del proyecto Rhodium que tiene una visualización interactiva de los datos una vez finaliza y guardas tus resultados en tu disco local.

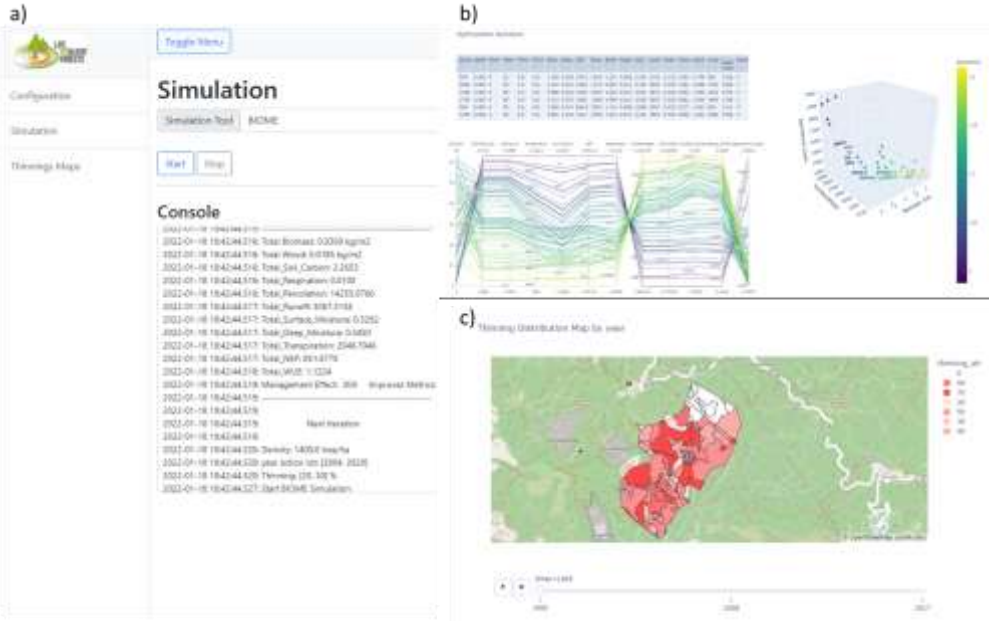


*Figura 4. Visualización interactiva de CAFE. a) Consola que muestra las iteraciones, b) Frente de Pareto de las soluciones óptimas y c) Mapa de distribución de claras.*

## 3.3. Configuración de uso de CAFÉ

CAFE permite al usuario soporte en multitud de casos prácticos de gestión, dado la gran variedad de situaciones que en la que es capaz de trabajar. Gracias a la diversidad de modelos de simulación y las diferentes combinaciones de actuaciones selvícolas que se pueden calcular o la gran variedad de métricas que se pueden optimizar. Permitiendo a los gestores con diferentes objetivos de uso (Productores o Protectores) su utilización para comprender la relación entre todas ellas.

Todos estas modificaciones o selecciones pueden realizarse fácilmente por medio de su interfaz gráfica de usuario (GUI) la cual está diseñada con una interfaz web por medio de Docker que permite al usuario utilizarla con unos sencillos pasos de instalación y sin necesidad de requerir dependencias.

Es por todo esto, que en cada caso de estudio el usuario debe configurar su trabajo a su medida para obtener la gestión selvícola que es necesaria aplicar, así puede optimizar las métricas que quiera conseguir con dicha actuación.

En el presente caso de estudio, se va a utilizar la configuración que se presenta en la tabla 2, donde se utilizará el modelo de simulación RHESsys (distribuido), para poder diferenciar el valor de actuación selvícola que se debe realizar a cada uno de los 36 rodales. La variable de decisión en este caso es la intensidad de clara (¿Cuánto?) que se debe aplicar a cada uno de ellos, donde sus valores oscilarán entre 20-80%, salvo cuando el rodal cumpla la restricción de pendiente superior a 30%. En ese caso, el rango de clara será del 20-40%. Además, se quiere obtener el máximo valor de las métricas de biomasa, percolación, biodiversidad y resiliencia, y minimizar el KBDI. De esta forma, se tiene caracterizada al menos una métrica de cada uno de los grupos del CAFE (Carbono, Agua, Fuego y Eco-resiliencia).

*Tabla 2. Configuración de CAFÉ.*

| Modelo de Simulación | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| X | Rhessys | | Tetis-Veg | | Biome | | CLM |
| **Variable Decisión** | | | | | | | |
| **Clara** | | | | | **Plantación** | | |
| X | ¿Cuánto? Min: **20%** Max: **80%** | | ¿Dónde? | | ¿Cuánto? | | |
| | ¿Cuándo? | | ¿Cómo? | | | | |
| **Funciones Objetivos** | | | | | | | |
| X | Extracción de biomasa | X | Maximizar | | Minimizar | | Info |
| X | Secuestro de carbono | | Maximizar | | Minimizar | X | Info |
| X | Respiración del suelo | | Maximizar | | Minimizar | X | Info |
| X | Percolación | X | Maximizar | | Minimizar | | Info |
| X | Flujo de base | | Maximizar | | Minimizar | X | Info |
| X | Flujo de corriente | | Maximizar | | Minimizar | X | Info |
| X | KBDI | | Maximizar | X | Minimizar | | Info |
| X | FWI | | Maximizar | | Minimizar | X | Info |
| X | Biodiversidad Estructura | X | Maximizar | | Minimizar | | Info |
| X | Resiliencia | X | Maximizar | | Minimizar | | Info |
| X | Situación de partida | | Maximizar | | Minimizar | X | Info |
| **Restricciones** | | | | | | | |
| X | Pendiente Máxima: **30%** Min: **20%** Max: **40%** | | Número Rodales | | Área | | |

### 3.4. Gestión Forestal

El presente trabajo plantea una gestión forestal tanto mono-objetivo como multiobjetivo. Es decir, se pretende obtener el diseño de la gestión forestal de cada uno de esos 36 rodales optimizando todas las métricas (biomasa, percolación, biodiversidad, resiliencia y KBDI) a la vez, así como por separado. La diferencia entre ambos enfoques es que, si selecciona una única métrica, la herramienta calcula una única solución, la que cumple dicho objetivo. Si, por el contrario, maximizas o minimizas dos o más métricas a la vez, el resultado que se puede obtener puede ser hasta 100 posibles soluciones, todas ellas igual de válidas en términos de optimización.

## 4. Resultados

### 4.1. Cuantificación sin gestión

La primera simulación que CAFE ejecuta corresponde a la de la situación de partida, es decir, el estado actual definido por el usuario en los datos de entrada del modelo escogido. Esta simulación es considerada como la línea base de cómo funciona el sistema, calculando y cuantificando las métricas que posteriormente se van a optimizar. En la tabla 3 se puede comprobar como es el valor de cada una de las métricas.

*Tabla 3. Resultados de las métricas sin gestión forestal.*

| Métricas | Valor Sin Gestión |
|---|---|
| Biomasa extraída | 0 |
| Secuestro de carbono | 0.61 |

| | |
|---|---|
| Respiración del suelo | 783.78 |
| Agua azul | 1591.88 |
| Agua circulante | 280.76 |
| Percolación | 781.85 |
| Kbdi promedio | 996.13 |
| Biodiversidad estructural | 8.62 |
| Resiliencia | - |

### 4.2. Gestión Multiobjetivo

La gestión multiobjetivo diseñada por CAFE arroja 98 resultados posibles que optimizan las 5 métricas (Biomasa extraída, percolación, riesgo de incendio, biodiversidad y resiliencia). En la Fig. 5 se puede ver como el PF y la relación entre métricas que presentan cada solución es diferente. Esto se puede ver tanto en el cubo 3D donde están las 5 métricas optimizadas (Eje x: Biomasa, Eje y: KBDI, Eje z: Percolación, Color: Resiliencia y Tamaño: biodiversidad), como en el gráfico 2d de coordenadas paralelas que muestra la conexiones entre las métricas, ya sean optimizadas o cuantificadas para cada solución.

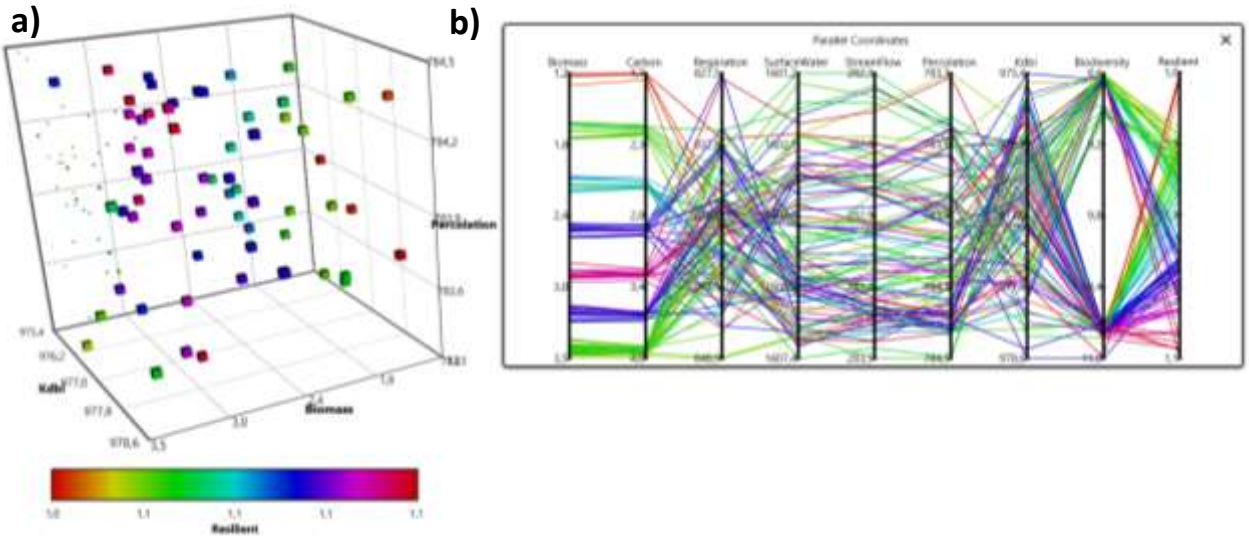


*Figura 5. Visualización interactiva de CAFE en J3 para gestión multiobjetivo. a) cubo 3D (Eje x: Biomasa, Eje y: KBDI, Eje z: Percolación, Color: Resiliencia y Tamaño: biodiversidad), b) gráfico 2 d de coordenadas paralelas.*

En este caso se observa que todas las soluciones obtenidas mejoran los valores de las métricas de la situación de partida (sin gestión). Ahora, de todas estas soluciones se extrae la siguiente información estadística, que describe cada una de las métricas en cuanto al valor medio, desviación y sus valores máximos y mínimos (Tabla 4). Con esta información se pueden ver aquellas que son más susceptibles a la gestión, como son la biomasa extraída y el carbono secuestrado, mientras que el grupo de agua ha experimentado un bajo impacto de la misma. Además, se puede comprobar la solución que produce el valor máximo de cada métrica es diferente cuando cambiamos de métrica. Es decir, en el caso de la biomasa, por ejemplo, la mejor solución es la número 54, mientras que la solución que menor riesgo de incendio produce (KBDI) es la número 43.

*Tabla 4. Valores de las métricas para criterio multiobjetivo.*

| Métricas | ID | Mean | Sd | Max | Min | Solución Mejor | Mejora media |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Biomasa extraída | Biomass | 2.78 | 0.67 | 3.54 | 1.20 | 54 | 2.78 (100%) |
| Secuestro de carbono | Carbon | 3.25 | 0.66 | 3.98 | 1.70 | | 2.63 (81%) |
| Respiración del suelo | Respiration | 739.13 | 4.28 | 748.86 | 727.53 | | - |
| Agua azul | SurfaceWater | 1604.88 | 1.55 | 1607.41 | 1601.18 | | 12.99 (0.81%) |
| Agua circulante | Streamflow | 282.97 | 0.30 | 283.46 | 282.27 | | 2.21 (0.78%) |
| Percolación | Percolation | 784.02 | 0.29 | 784.50 | 783.31 | 4 | 2.17 (0.27%) |
| Kbdi | kbdi | 976.86 | 0.78 | 978.62 | 975.39 | 43 | 19.27 (2%) |
| Biodiversidad estructural | Biodiversity | 10.02 | 1.00 | 11.01 | 8.63 | 1 | 1.40 (14%) |
| Resiliencia | Resilient | 1.08 | 0.02 | 1.12 | 1.04 | 30 | 0.08 (7.6%) |

A la hora de seleccionar una solución como la más apropiada, se puede realizar un filtrado según el criterio del usuario donde priorice una métrica frente a otra. Este filtrado se facilita mediante el uso del "ecualizador" (Brushing en la Fig. 6 superior), que mediante el movimiento de sus barras horizontales descarta las soluciones que no cumplen con el criterio deseado. Tras esta selección, se puede ver el mapa de distribución de gestión que lleva asociada la obtención de estos valores de métricas (Fig. 6 inferior).

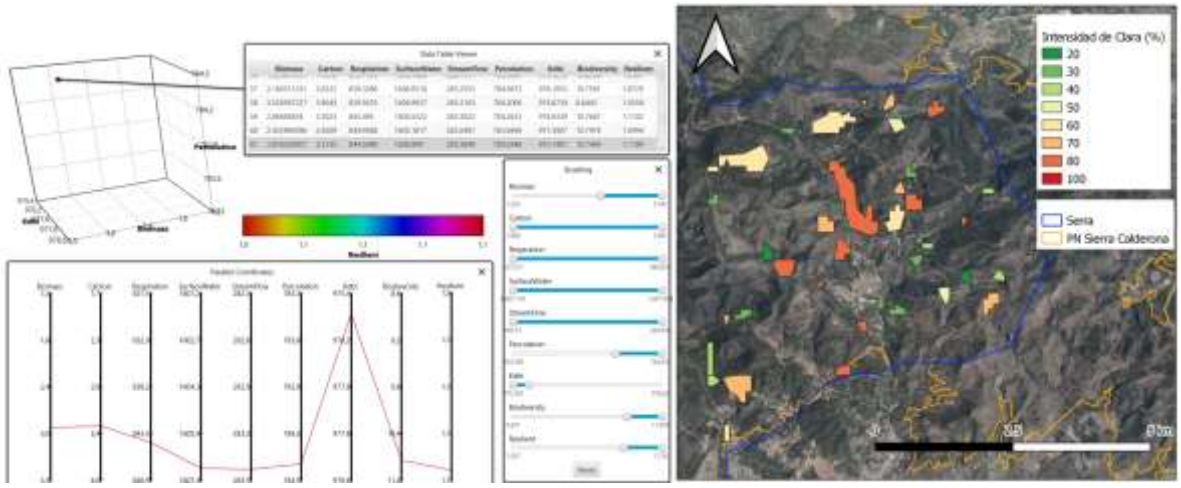


*Figura 6. Filtrado de solución para la gestión multiobjetivo. Superior: Visualización interactiva J3, Inferior: Mapa de distribución de clara.*

### 4.3. Gestión Monobjetivo

La gestión monobjetivo necesita ejecutarse en CAFE una vez por cada métrica a optimizar de forma independiente, obteniéndose un único resultado por ejecución (Tabla 5). En este caso, los valores por métrica obtenidos mediante la optimización monobjetivo son mejores a los obtenidos

mediante la optimización multiobjetivo, es decir, valores más altos para las métricas maximizadas (Biomasa, Percolación, Biodiversidad y Resiliencia) y valores más bajos para la minimizada (KBDI) (ver tablas 4 y 5).

*Tabla 5. Valores de las métricas realizando gestión monobjetivo.*

| | Criterio Monobjetivo: Métrica optimizada | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Métricas** | **Biomasa Extraída (OF)** | **Percolación (OF)** | **Kdbi (OF)** | **Biodiversidad (OF)** | **Resiliencia (OF)** |
| Biomasa extraída | **3.57** | 3.26 | 2.86 | 1.20 | 2.85 |
| Secuestro de carbono | 3.98 | 3.69 | 3.30 | 1.69 | 3.30 |
| Respiración del suelo | 748.43 | 745.09 | 732.51 | 730.70 | 732.20 |
| Agua azul | 1607.05 | 1607.34 | 1606.03 | 1602.64 | 1605.49 |
| Agua circulante | 283.36 | 283.46 | 283.17 | 282.60 | 283.13 |
| Percolación | 784.22 | **784.56** | 784.03 | 783.78 | 783.96 |
| Kbdi | 975.43 | 976.95 | **975.29** | 979.19 | 978.49 |
| Biodiversidad estructural | 8.65 | 8.63 | 10.74 | **11.10** | 8.63 |
| Resiliencia | 1.06 | 1.10 | 1.11 | 1.04 | **1.13** |

## 5. Discusión

La cuantificación inicial llevada a cabo por CAFE proporciona al usuario información de precisión relativa a la provisión de B&S del área de estudio en su estado actual. Dicha información puede además poner de manifiesto ciertas necesidades y/u objetivos de gestión. En el caso concreto de Serra, destaca la escasa percolación anual, limitándose esta a unos 26 mm/año. Estos resultados van en la línea de los obtenidos por del Campo et al 2019 y González-Sanchis et al 2019 para la misma zona de estudio y utilizando diferentes técnicas (experimental y simulación con Tetis, respectivamente). De igual forma, el secuestro anual de C (6 t/ha año), que contempla tanto suelo como vuelo, da una idea de la baja productividad del sistema, y por tanto del rango en el que se puede situar la gestión forestal orientada a la biomasa y/o a la descarbonización. Es cierto que los ecosistemas forestales semi-áridos tienen una productividad baja (Rotenberg y Yakir, 2010), y por tanto no son los más indicados para llevar a cabo grandes estrategias de descarbonización. Sin embargo, una gestión forestal óptima puede llegar a estimular la productividad de individuos clave generando así un incremento del secuestro de C global significativo.

La gestión forestal monobjetivo ha resultado significativamente beneficiosa tan sólo en el caso del secuestro de C, biodiversidad estructural y resiliencia climática. En el caso del agua, ésta apenas se ve mejorada, resultado que concuerda totalmente con el estudio de González-Sanchis et al 2019, donde se constató que en zonas con precipitaciones anuales por debajo de 380 mm la gestión forestal no genera un incremento significativo del aporte hídrico. Probablemente por este hecho, el objetivo que parece alcanzar un equilibrio entre todas las métricas es precisamente el del agua.

Cuando se diseña la gestión forestal multiobjetivo, si bien se incrementa la complejidad, se aumenta también el número de soluciones posibles que alcanzan un equilibrio entre todas las métricas, aunque de nuevo la percolación parece no verse significativamente afectada por la gestión. En el caso del riesgo de incendio, la gestión tampoco parece modificar significativamente el índice empleado (KBDI), probablemente porque se trata del valor de riesgo medio de toda la serie, y eso suaviza mucho la mejora en los meses de verano. Sin embargo, lo que sí disminuye el número de días

por debajo de riesgo alto en un 20 % (datos no mostrados). En el extremo opuesto se encontrarían la resiliencia y la biodiversidad estructural, que parecen incrementar en todos los escenarios de gestión barajados. Este resultado contribuye a plantear estrategias de gestión forestal en zonas semi-áridas como herramienta para hacer frente al Cambio Climático, donde variables como resiliencia y biodiversidad van a ser claves.

## 6. Conclusiones

La cuantificación inicial de la provisión de B&S derivados de este monte semiárido pone de manifiesto la fragilidad del mismo y el escaso rango de maniobra, al menos en términos hídricos y de C. Al aplicar CAFE, este hecho se confirma, aunque sí se consigue un escenario que incremente la productividad. Por el contrario, las variables resiliencia y biodiversidad estructural aparecen como las más beneficiadas. Este hecho destaca la gestión forestal como herramienta fundamental para hacer frente al cambio climático, incluso en zonas forestales tan límites como la de este estudio, donde la toma de decisiones requiere involucrar la mayor evidencia e información disponible.

El DSS CAFE aunque complejo, se presenta como una herramienta útil y capaz de sugerir esquemas de gestión forestal incluso en zonas de tan escasa productividad, pero donde se maximiza la generación de otros B&S que son también indispensables para multifuncionalidad de los bosques. Sería por tanto conveniente ejecutar la herramienta en zonas más favorables donde el rango de mejora sea mayor para métricas como agua y biomasa (madera).

Los resultados obtenidos del uso del DSS CAFE en la zona de estudio permiten mostrar las ventajas de disponer de estas herramientas para la toma de decisiones basadas en evidencias ante diferentes escenarios de gestión forestal. Lo que facilita como lo han expresado algunos técnicos forestales de la zona, tomar decisiones mejor informadas y mostrar un mayor grado de desempeño laboral, lo que de acuerdo con Pastorella et al. (2015) hace parte indispensable de la percepción de utilidad de la herramienta y facilita e incentiva su implementación.

## 7. Agradecimientos

Este estudio ha sido posible desarrollarse gracias al proyecto RESILIENT-FORESTS (LIFE17 CCA/ES/000063). 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 han contribuido al desarrollo de este trabajo.

## 8. Bibliografía

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, 2535–2548. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.05.010

BONAN, G.B., 2008. Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. Science 320, 1444–1449. https://doi.org/10.1126/science.1155121

BRADSHAW, R.H.W., SYKES, M.T., 2014. Ecosystem Dynamics: From the Past to the Future. Wiley-Blackwell.

BRAVO, F., LEMAY, V., JANDL, R. (Eds.), 2017. Managing Forest Ecosystems: The Challenge of Climate Change, Managing Forest Ecosystems. Springer International Publishing, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28250-3

CRISTAL, I., AMEZTEGUI, A., GONZÁLEZ-OLABARRIA, J.R., GARCIA-GONZALO, J., 2019. A Decision Support Tool for Assessing the Impact of Climate Change on Multiple Ecosystem Services. Forests 10, 440. https://doi.org/10.3390/f10050440.

DEL CAMPO, A. D., GONZÁLEZ-SANCHIS, M., MOLINA, A. J., GARCÍA-PRATS, A., CEACERO, C. J., & BAUTISTA, I. (2019). Effectiveness of water-oriented thinning in two semiarid forests: The redistribution of increased net rainfall into soil water, drainage and runoff. Forest Ecology and Management, 438, 163-175.

DE MARTONNE, E., 1926. Une nouvelle function climatologique : L'indice d'aridite. Meteorologie 2, 449–459.

DEB, K., 2015. Multi-Objective Evolutionary Algorithms, in: Kacprzyk, J., Pedrycz, W. (Eds.), Springer Handbook of Computational Intelligence, Springer Handbooks. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 995–1015. https://doi.org/10.1007/978-3-662-43505-2_49

FRANCÉS, F., VÉLEZ, J.I., VÉLEZ, J.J., 2007. Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. Journal of Hydrology 332, 226–240. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.06.032

GARCIA, L.A., ARMBRUSTER, M., 1997. A decision support system for evaluation of wildlife habitat. Ecological Modelling 102, 287–300. https://doi.org/10.1016/S0304-3800(97)00064-1

GONZÁLEZ-SANCHIS, M., RUIZ-PÉREZ, G., DEL CAMPO, A. D., GARCIA-PRATS, A., FRANCÉS, F., & LULL, C. (2019). Managing low productive forests at catchment scale: considering water, biomass and fire risk to achieve economic feasibility. Journal of environmental management, 231, 653-665.

HADJIMICHAEL, A., GOLD, D., HADKA, D., REED, P., 2020. Rhodium: Python Library for Many-Objective Robust Decision Making and Exploratory Modeling. Journal of Open Research Software 8, 12. https://doi.org/10.5334/jors.293

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.

JAHANI, A., RAYEGANI, B., 2020. Forest landscape visual quality evaluation using artificial intelligence techniques as a decision support system. Stoch Environ Res Risk Assess. https://doi.org/10.1007/s00477-020-01832-x

JORGENSEN, S.E. (Ed.), 2011. Handbook of Ecological Models used in Ecosystem and Environmental Management. CRC Press, Boca Raton. https://doi.org/10.1201/b10791

MALDONADO, S., GONZÁLEZ-RAMÍREZ, R.G., QUIJADA, F., RAMÍREZ-NAFARRATE, A., 2019. Analytics meets port logistics: A decision support system for container stacking operations. Decision Support Systems 121, 84–93. https://doi.org/10.1016/j.dss.2019.04.006

MORALES, P., SYKES, M.T., PRENTICE, I.C., SMITH, P., SMITH, B., BUGMANN, H., ZIERL, B., FRIEDLINGSTEIN, P., VIOVY, N., SABATÉ, S., SÁNCHEZ, A., PLA, E., GRACIA, C.A., SITCH, S.,

ARNETH, A., OGEE, J., 2005. Comparing and evaluating process-based ecosystem model predictions of carbon and water fluxes in major European forest biomes. Global Change Biology 11, 2211–2233. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01036.x

NOBLE, P., PAVEGLIO, T.B., 2020. Exploring Adoption of the Wildland Fire Decision Support System: End User Perspectives. Journal of Forestry 118, 154–171. https://doi.org/10.1093/jofore/fvz070

PASTORELLA, F., BORGES, JG., DE MEO, I. Usefulness and perceived usefulness of Decision Support Systems (DSSs) in participatory forest planning: the final users' point of view. iForest. doi: 10.3832/ifor1356-008

RAUSCHER, H.M., LLOYD, F.T., LOFTIS, D.L., TWERY, M.J., 2000. A practical decision-analysis process for forest ecosystem management. Computers and Electronics in Agriculture 27, 195–226. https://doi.org/10.1016/S0168-1699(00)00108-3.

Rotenberg, E., & Yakir, D. (2010). Contribution of semi-arid forests to the climate system. Science, 327(5964), 451-454.

RUNNING, S.W., HUNT, E.R., 1993. 8 - Generalization of a Forest Ecosystem Process Model for Other Biomes, BIOME-BGC, and an Application for Global-Scale Models, in: Ehleringer, J.R., Field, C.B. (Eds.), Scaling Physiological Processes, Physiological Ecology. Academic Press, San Diego, pp. 141–158. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-233440-5.50014-2

STEWART, A., EDWARDS, D., LAWRENCE, A., 2013. Improving the science-policy-practice interface: decision support system uptake and use in the forestry sector in Great Britain. Scandinavian Journal of Forest Research. http://dx.doi.org/10.1080/02827581.2013.849358

TAGUE, C.L., BAND, L.E., 2004. RHESSys: Regional Hydro-Ecologic Simulation System—An Object-Oriented Approach to Spatially Distributed Modeling of Carbon, Water, and Nutrient Cycling. Earth Interactions 8, 1–42. https://doi.org/10.1175/1087-3562(2004)8<1:RRHSSO>2.0.CO;2

TANEVSKI, J., SIMIDJIEVSKI, N., TODOROVSKI, L., DŽEROSKI, S., 2017. PROCESS-BASED MODELING AND DESIGN OF DYNAMICAL SYSTEMS, IN: ALTUN, Y., DAS, K., MIELIKÄINEN, T., MALERBA, D., STEFANOWSKI, J., READ, J., ŽITNIK, M., CECI, M., DŽEROSKI, S. (Eds.), Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases, Lecture Notes in Computer Science. Springer International Publishing, Cham, pp. 378–382. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71273-4_35

THORNTHWAITE, C.W., 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate. Geographical Review 38, 55–94. https://doi.org/10.2307/210739

WIEGERT, R.G., 1975. Simulation Models of Ecosystems. Annual Review of Ecology and Systematics 6, 311–338.

ZHOU, A., QU, B.-Y., LI, H., ZHAO, S.-Z., SUGANTHAN, P.N., ZHANG, Q., 2011. Multiobjective evolutionary algorithms: A survey of the state of the art. Swarm and Evolutionary Computation 1, 32–49. https://doi.org/10.1016/j.swevo.2011.03.001