



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

Forema-DST: Un método basado en simulación mecanística para evaluar los efectos de la gestión forestal y el cambio climático

CRISTAL, I.^{1,2,3}, AMEZTEGUI, A.^{1,2} GONZALEZ-OLABARRIA, J. R.¹ y GARCÍA GONZALO, J.¹

¹ Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya.

² Universitat de Lleida.

³ Forest Bioengineering Solutions.

Resumen

Los ecosistemas forestales se ven afectados por el cambio climático a diferentes niveles y requieren múltiples enfoques de gestión. Por eso, es crucial conocer los efectos de la gestión y el cambio climático para una variedad de especies y sitios.

El objetivo de este estudio fue desarrollar una herramienta de apoyo a la toma de decisiones que estime el impacto de diferentes alternativas de gestión forestal y de servicios ecosistémicos, bajo diferentes escenarios de cambio climático. Para ello ampliamos Forema-DST, un software que combina un simulador de crecimiento forestal basado en procesos (SORTIE-ND) con modelos empíricos de servicios ecosistémicos, con el fin de simular una gestión adaptada a diferentes escenarios climáticos y en concordancia con los objetivos de gestión. En este estudio ilustramos la funcionalidad del sistema a través de una serie de simulaciones de bosques situados a lo largo del gradiente climático de Cataluña.

Palabras clave

Sistema de apoyo a la toma de decisiones, simulación forestal, *Pinus sylvestris*, cambio global, servicios ecosistémicos.

1. Introducción

La ordenación forestal sostenible requiere conocimientos sobre los ecosistemas forestales y su futuro desarrollo en el marco del cambio climático. Hoy en día, los modelos de crecimiento forestal facilitan la comprensión y permiten proyectar los cambios en el bosque a diferentes escalas temporales y espaciales (WIKSTRÖM et al. 2011, TERRADES 2005, LAROCQUE 2015, TENZIN et al. 2017). Estos modelos brindan la oportunidad de analizar el posible impacto de diferentes prácticas para una amplia gama de ecosistemas.

Durante las últimas décadas, el cambio climático ha impuesto un cambio en los objetivos de gestión hacia el aumento de la resiliencia de los bosques al cambio global. Como resultado, han surgido muchos modelos que explican las respuestas de los bosques a estas nuevas amenazas. Estos modelos se dividen en modelos basados en procesos (PB) y basados en datos (DD). Los modelos de PB se basan en procesos ecofisiológicos y mecánicos de las plantas y utilizan formulaciones matemáticas para describir los procesos subyacentes y sus interacciones (Adams et al. 2013). Las simulaciones por computadora de los modelos PB pueden predecir cambios en la dinámica de la vegetación bajo escenarios de cambio climático y pueden ayudar a mejorar la gestión del ecosistema (GARCÍA-GONZALO et al. 2007). Los modelos basados en datos, por otro lado, se basan en observaciones pasadas para hacer predicciones futuras. Ambos métodos, y combinaciones de ellos, se utilizan hoy en día para

proyectar la dinámica forestal y tienen un gran potencial para ser utilizados en la práctica para ayudar a la toma de decisiones en la gestión forestal.

Varios estudios combinan modelos PB y/o DD para evaluar el suministro de productos madereros y no madereros. WIKSTRÖM et al., 2011, presentó un sistema de toma de decisiones capaz de estimar valoraciones de áreas recreativas, secuestro de carbono y adecuación del hábitat mediante el acoplamiento de modelos de crecimiento forestal y modelos de servicios ecosistémicos (ES); García-Gonzalo et al. amplió el SADfLOR DSS (BORGES et al., 2014) para incluir el análisis de compensación entre la producción de madera, el corcho y el carbono. HANEWINKEL et al., 2010, discutieron la posibilidad de incorporar modelos mecánicos y empíricos de riesgo de tormentas, así como un modelo empírico de riesgo de incendio en simuladores de crecimiento, para evaluar el impacto de las perturbaciones en los bosques. Posteriormente, REYERS et al., 2017, analizaron seis estudios en Europa donde los modelos de crecimiento y rendimiento sensibles al clima se combinaron con modelos de evaluación de riesgos para evaluar el impacto conjunto del cambio climático y las perturbaciones en la producción forestal.

Si bien el software orientado a la investigación, como los mencionados anteriormente, puede evaluar el impacto del cambio climático en los bosques, hereda la complejidad de los modelos matemáticos, lo que los hace inadecuados para el uso práctico (NUTE et al., 2004). Además, no incorporan múltiples ES o indicadores de riesgo (por ejemplo, incendios forestales) frente al cambio climático. Por lo tanto, se necesitan nuevos enfoques adaptados a los objetivos de gestión y desarrollados en estrecha cooperación con los administradores forestales para acercar investigación y práctica forestal.

Aquí presentamos Forema-DST, una herramienta de apoyo a la toma de decisiones orientada a la gestión, que combina modelos PB de dinámica forestal (SORTIE-ND) y modelos DD de ES e indicadores de riesgo. A través de simulaciones de rodales de *Pinus sylvestris*, situados a lo largo de un gradiente climático en Cataluña, exploramos la capacidad del software para evaluar cómo el cambio climático y la gestión forestal afectan a los bosques, y cómo adaptar la gestión forestal a las nuevas condiciones ambientales.

2. Objetivos

El objetivo principal del estudio fue mejorar la aplicabilidad práctica de las proyecciones forestales a largo plazo frente al cambio climático y mejorar la comprensión de los conceptos de gestión sostenible de los recursos naturales. Debido a su complejidad, muchos modelos de dinámica forestal que abordan el cambio global en los ecosistemas terrestres se limitan al uso científico y a un área geográfica específica (NUTE et al., 2004). Mediante el diseño de un enfoque orientado a la gestión y la integración de conocimientos prácticos con los resultados científicos, nuestro objetivo es mejorar los procesos de toma de decisiones en la gestión forestal. El usuario de Forema-DST podrá:

1. Proyectar el crecimiento forestal bajo escenarios de cambio climático y diferentes objetivos de gestión.
2. Evaluar los impactos del cambio climático en los bosques y los servicios ecosistémicos forestales, ahora y en el futuro, y evaluar los futuros riesgos.
3. Analizar cómo la gestión forestal puede mitigar los efectos potenciales del cambio climático
4. Adaptar las estrategias de gestión forestal al clima cambiante

3. Metodología

3.1. Área de estudio

Cataluña, situada en el noreste de España, está cubierta por un 60% de suelo forestal, de los cuales los pinos y los robles son las especies arbóreas dominantes. Una de las especies más importantes de Cataluña (1ª en cuanto a existencias en formación y volumen cosechado, y 2ª en superficie cubierta) es *Pinus sylvestris*, una especie adaptada a un amplio abanico de condiciones, abundante en las sierras catalanas entre los 800 y 1600 m de altitud (Gracia et al., 2004).

La altitud de Cataluña oscila entre los 0 y los 3000 metros sobre el nivel del mar, creando cinturones climáticos que contribuyen en gran medida a la variabilidad climática y meteorológica y a la heterogeneidad de la cubierta forestal.

3.2. Gestión de rodal en Forema-DST

Forema-DST es una herramienta de apoyo a las decisiones de gestión forestal, que combina un modelo basado en procesos Sortie-ND (CANHAM et al. 2001), parametrizado para cuatro especies forestales en Cataluña (AMEZTEGUI et al. 2015) con modelos empíricos de servicios ecosistémicos (CRISTAL et al. 2019). Los cinco componentes principales que conforman la herramienta son: la base de datos, el generador de alternativas, el simulador forestal, la calculadora de servicios ecosistémicos y el componente de visualización. El software toma como entrada las características del rodal y los árboles, los datos climáticos y las alternativas de gestión, y proyecta el estado del rodal a lo largo del tiempo.

Los bosques catalanes se caracterizan por su multifuncionalidad. Algunos de los servicios ecosistémicos comúnmente proporcionados, además de la madera y la producción de madera, son la recreación, la producción de setas y el secuestro de carbono. Los administradores forestales deben reconocer la multitud de servicios ecosistémicos e incorporarlos en los planes de gestión forestal. Para ayudar en el proceso de toma de decisiones, identificamos e implementamos en Forema-DST los siguientes objetivos principales:

- Producción de madera
- Producción no maderera (p. ej., setas)
- Mitigación de riesgos (p. ej., incendios, erosión)
- Biodiversidad y conservación

Por lo tanto, Forema-DST utiliza el objetivo de gestión para definir las claras; es decir, en lugar de definir a priori el momento de la clara, la clara se activa cada vez que el objetivo alcanza el límite predefinido. De esta forma, la gestión se adapta al ritmo de desarrollo del rodal (Figura 1).

Forema-DST define las alternativas de gestión en términos del horizonte de simulación (o duración de la rotación en el caso de una gestión de edad uniforme), tiempo e intensidad de clara, corte final y regeneración. En la siembra, el usuario proporciona el año de siembra y el número de plántulas. La clara se basa en la reducción del área basal, que se convierte en el número de árboles que se eliminarán de cada rodal. El corte final se implementa como un método de protección de madera.

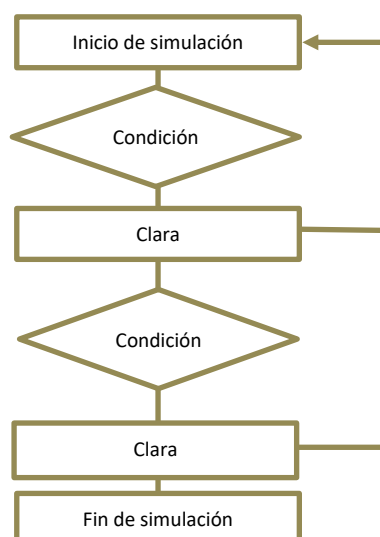


Figura 1. Simulación de gestión orientada a objetivos: Se simula el rodal hasta alcanzar el límite superior del objetivo planteado. Esto activa la primera clara y la simulación se reinicia. El proceso continúa hasta que se cumplen todos los requisitos

3.3. Ejemplo ilustrativo

Seleccionamos rodales representativos de *P. sylvestris*, a lo largo del gradiente climático de Cataluña, correspondientes a hábitats xéricos, mésicos y húmedos (Tabla 1). El área del rodal se fijó en 1 ha, y la densidad inicial de todos los rodales se fijó en 1400 árboles, cayendo igualmente en las clases DAP (diámetro a la altura del pecho) de 0-15 cm y 15-20 cm respectivamente.

Tabla 1. Características de las zonas de estudio.

Rodal	Latitud (grados)	Longitud (grados)	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)	Pendiente (grados)	Orientación (grados)	Altitud (m)
Xeric	42.08859	2.105232	784.5	10.9	12.3777	0.216032	830.807
Mesic	42.44796	1.248929	860.6	7.6	44.7554	0.781129	1400.37
Humid	42.25717	1.824013	1080.5	8.6	50.6316	0.883688	1160.36

Para cada una de las masas forestales, consideramos dos escenarios climáticos: (a) el clima actual, sin cambios durante toda la simulación, y (b) el escenario de cambio climático basado en el escenario RCP 4.5. Las predicciones mensuales de temperatura y precipitación para el escenario de cambio climático se obtuvieron reduciendo la escala del modelo dinámico regional CCLM4-8-17 a las coordenadas de la parcela utilizando el paquete R “meteoland” (DE CACERES et al. 2018) (Figura 2).

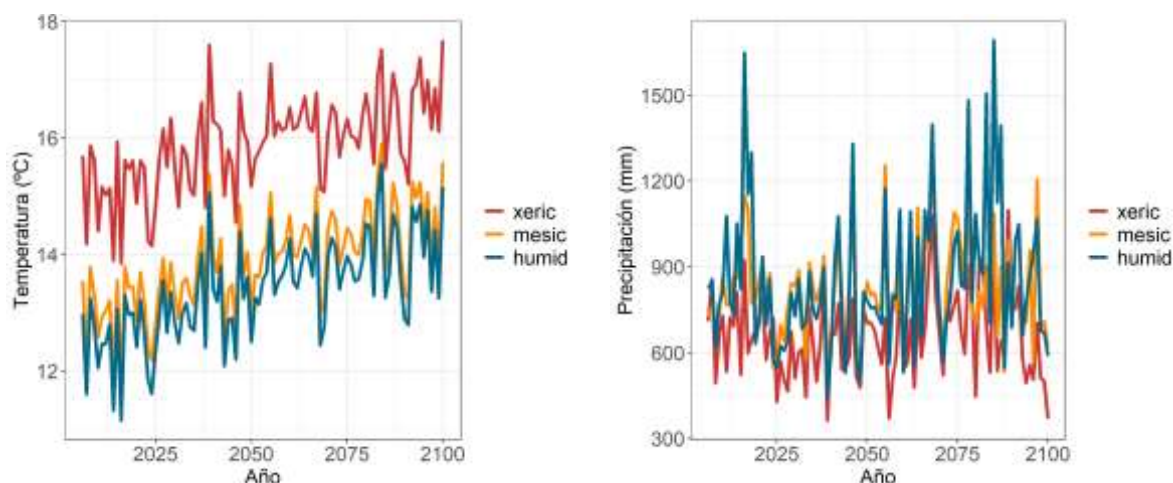


Figura2. Temperatura y precipitación bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5

Simulamos rodales de *P. sylvestris* con el objetivo de producir madera y mitigar el riesgo de incendios. Como alternativa de gestión se consideraron claras consecutivas que remueven de promedio el 30% del área basal del rodal, seguidas de claras sucesivas, removiendo 40% del área basal en la tala preparatoria, 60% en la de diseminación y 90% en la tala final (Tabla 2).

Tabla 2. Descripción de los objetivos de gestión.

Clara	DAP promedio (cm)	área basal talada (%)
1	15	60 (DAP<20cm)
2	25	100 (DAP<20cm) 25 (DAP>20cm)
3	35	30
Preparatoria	45	40
Diseminatoria		50
Final		90

4. Resultados

4.1. Uso del sistema

La interfaz de usuario de Forema-DST guía al usuario a través de los cinco módulos del sistema. El primer paso es introducir las características iniciales del rodal forestal. El segundo paso es definir el escenario de cambio climático, cargando archivos de precipitación y temperatura. La interfaz de gestión, en el tercer paso, permite al usuario elegir el objetivo de gestión (por ejemplo, madera, reducción de riesgos o biodiversidad) y especificar el número de claras. Durante la simulación, en el paso cuatro, se aplican claras cada vez que se alcanza el objetivo de gestión (p. ej., el tamaño comercial de la madera en el caso del objetivo de producir madera, o el umbral del indicador de riesgo de incendio, en el caso del objetivo de mitigación del riesgo). En el paso final, el sistema proporciona métodos de visualización, donde las

alternativas pueden visualizarse en forma de mapas, tablas y gráficos, y compararse entre ellos.

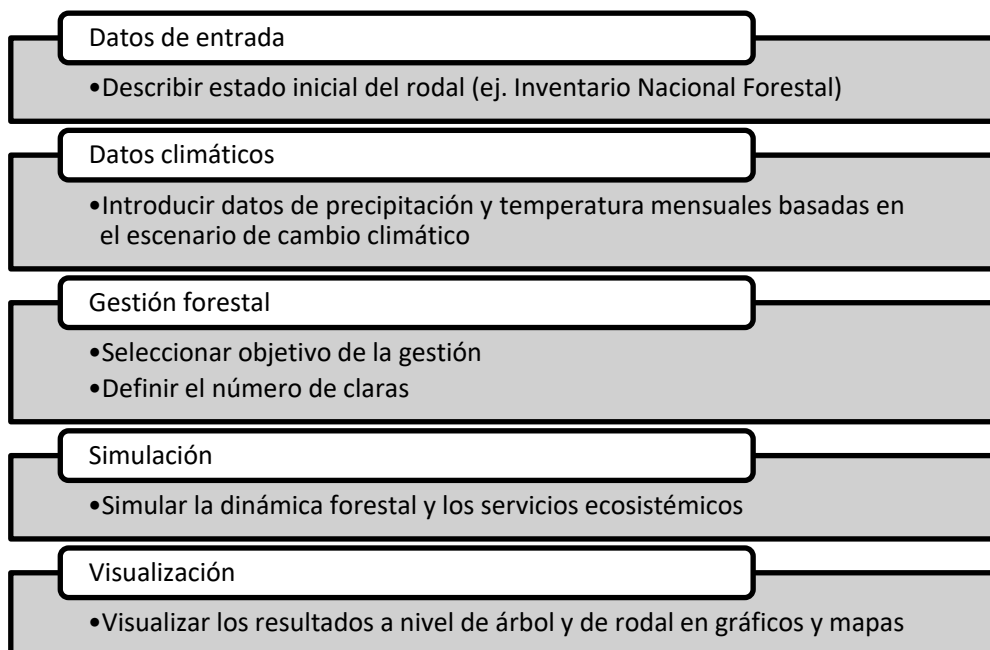


Figura 2. Fases de Forema-DST.

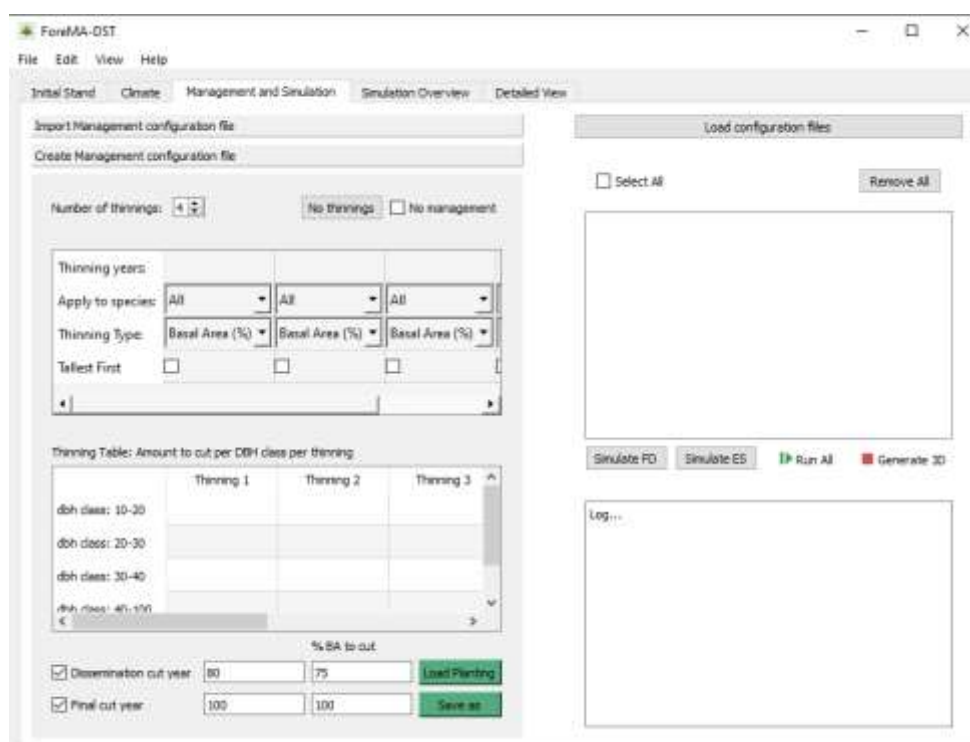


Figura 3. Ejemplo de interfaz de usuario de Forema-DST, módulo de gestión. Aquí el usuario final puede definir manualmente el número y la periodicidad de las claras.

4.2. Efectos del cambio climático en los rodales

Para demostrar la funcionalidad del sistema y el cumplimiento de sus objetivos, analizaremos los resultados de la simulación de los rodales de *P. sylvestris*. Se realizaron simulaciones para dos escenarios climáticos: actual, con tendencia de temperatura y precipitación sin cambios, y escenario de cambio climático basado en RCP 4.5. Adicionalmente, existen dos alternativas de gestión: rodal sin gestionar y rodal gestionado con el fin de maximizar la producción de madera y minimizar el riesgo de incendio (ver detalles en la sección de metodología).

En los rodales de control de *P. sylvestris* (Figura 4.a), podemos observar el valor del área basal final alcanzando los $90 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$ en los rodales húmedos y mésicos, mientras que el rodal xérico presenta una menor tasa de desarrollo, alcanzando los $75 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$ después de un período de simulación de 100 años. Por el contrario, las simulaciones realizadas considerando el cambio climático (Figura 4.b) muestran una disminución en el desarrollo del humedal, llegando a $55 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$ en 100 años, o un incremento del área basal total de $30 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$. Los sitios xéricos y mésicos mantienen tasas de desarrollo similares, con un incremento total del área basal de $42 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$ en 100 años.

Al implementar la gestión, podemos ver que el escenario climático actual, tiene una duración de rotación más corta: 70 años para húmedo y mésico, y 80 para el rodal xérico, en comparación con el escenario RCP 4.5: 100 años para el xérico, 105 para el mésico y 140 para el húmedo.

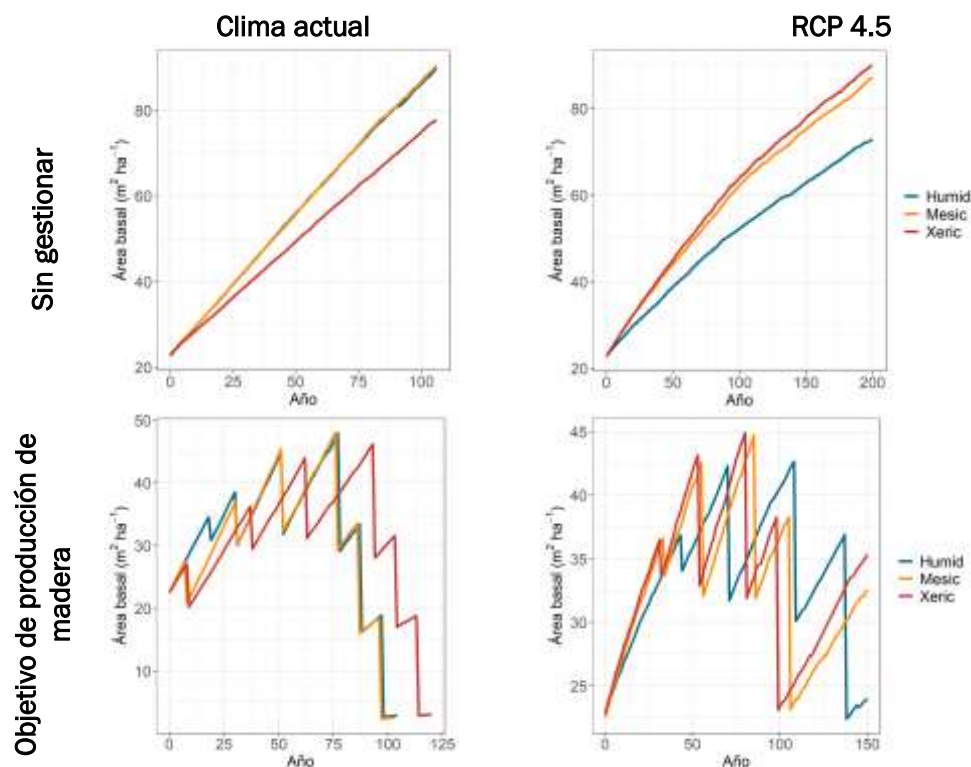


Figura 4. Cambios en el área basal de los rodales de *P. sylvestris* observados en simulaciones con (b, d) y sin (a, c) perspectiva de cambio climático, con (c, d) y sin gestión (a, b).

Si observamos ahora la producción no maderera, por ejemplo, la producción de setas, bajo las mismas condiciones de simulación, podemos ver un efecto favorable tanto de las claras como del cambio climático en la producción total de setas, en comparación con la alternativa sin gestión (Figura 5).

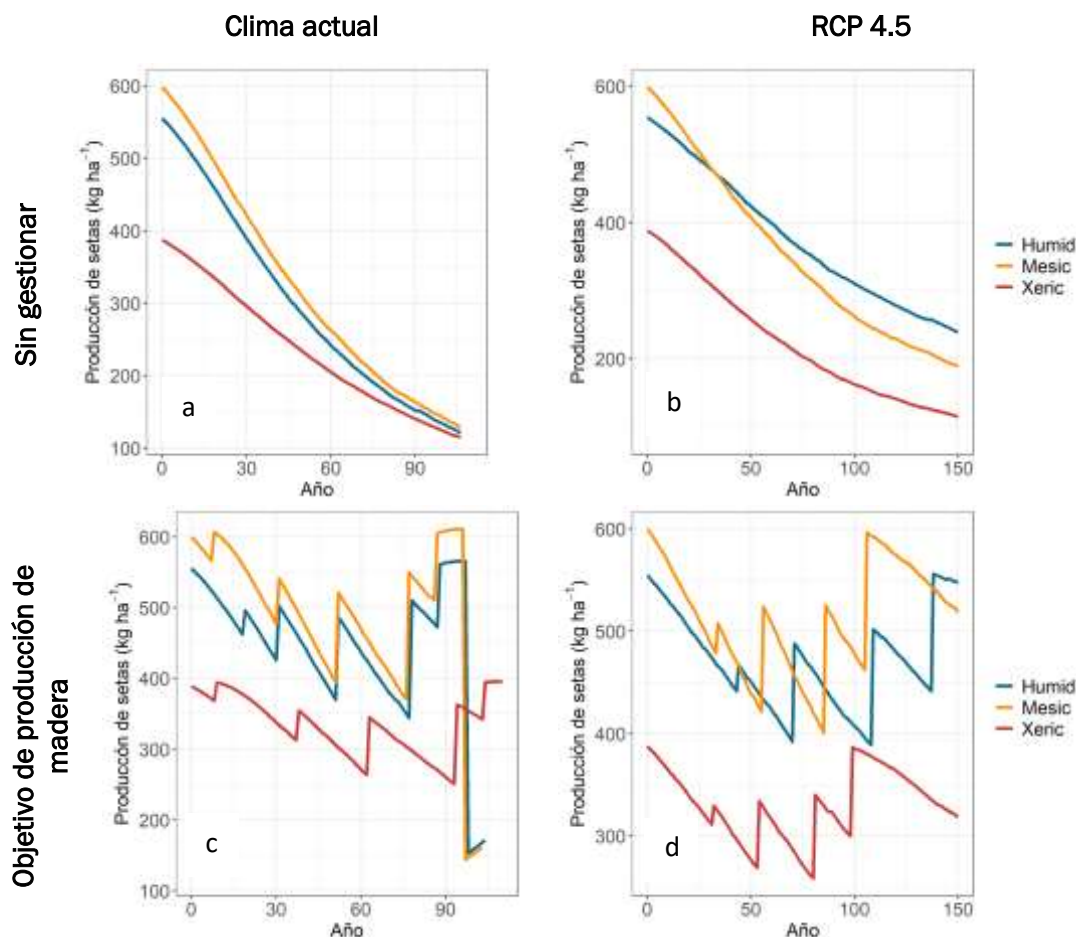


Figura 5. Cambios en la producción de setas de rodales de *P. sylvestris* observados en simulaciones con (b, d) y sin (a, c) perspectiva de cambio climático, con (c, d) y sin gestión (a, b).

5. Discusión

Mediante el diseño de un sistema de apoyo a la toma de decisiones, siguiendo un enfoque orientado a la gestión e integrando conocimientos prácticos con los resultados científicos, buscamos promover la aplicabilidad de las simulaciones basadas en procesos en la gestión forestal.

El sistema permite simular masas forestales bajo diferentes escenarios climáticos y alternativas de gestión, como se muestra en el ejemplo ilustrativo de las masas de *P. sylvestris*. Forema-DST puede evaluar los impactos del cambio climático en el crecimiento de rodales y la producción de servicios ecosistémicos forestales. Los resultados de la simulación mostraron cómo las respuestas de los rodales de *P. sylvestris* al clima y las actividades

antropogénicas varían a lo largo del gradiente climático de Cataluña. Se observó que el área basal final después de 100 años de simulaciones es similar a estudios previos de rodales gestionados en Cataluña (AMEZTEGUI et al., 2017, PIQUÉ et al., 2011a). Las claras, eliminando 30% del área basal, mostraron un impacto favorable en el crecimiento de los árboles, que era el principal objetivo de la gestión implementada, pero también en la producción total de setas. Este hecho también está respaldado por estudios experimentales en Cataluña (BONET et al, 2011), donde los autores reportan un efecto inmediato en la producción de setas después de eliminar de 20% a 30% el área basal, seguido de una disminución en la producción los años siguientes después de la clara.

6. Conclusiones

A través del ejemplo ilustrativo de simulación, mostramos cómo los administradores forestales pueden hacer uso del software presentado para analizar los efectos potenciales del cambio climático. Las simulaciones también revelaron la variabilidad en los umbrales de claras al aplicar escenarios de cambio climático y la importancia de adaptar las estrategias de manejo forestal a estos cambios. Sin embargo, al realizar proyecciones a largo plazo, el usuario debe ser consciente de las incertidumbres de los resultados relacionados con escenarios de cambio climático o desastres naturales (por ejemplo, brotes de plagas, incendios forestales, etc.).

7. Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por la Beca Doctorats Industrials de la Generalitat de Catalunya. Muchas gracias a Lena Vilà Vilardell por su valiosa ayuda en la edición de la versión en español del manuscrito.

8. Bibliografía

ADAMS, H. D.; WILLIAMS, A. P.; XU, C.; RAUSCHER S. A.; JIANG, X.; MCDOWELL, N. G.; & MULLER, B.; 2013. Empirical and process-based approaches to climate-induced forest mortality models. *Frontiers in plant science*, 4, 438

AMEZTEGUI, A., CABON, A., CÁCERES, M. DE, & COLL, L.; 2017. Managing stand density to enhance the adaptability of Scots pine stands to climate change: A modelling approach. *Ecological Modelling*, 356, 141–150.

AMEZTEGUI, A.; COLL, L.; MESSIER, C.; 2015. Modelling the effect of climate-induced changes in recruitment and juvenile growth on mixed-forest dynamics: The case of montane—Subalpine Pyrenean ecotones. *Ecological Modeling* 313, 84–93.

BONET, J.A.; DE-MIGUEL, S.; DE ARAGÓN, J.M.; PUKKALA; T. AND PALAHÍ, M. 2012. Immediate effect of thinning on the yield of *Lactarius group deliciosus* in *Pinus pinaster* forests in Northeastern Spain. *Forest Ecology and Management*, 265, pp.211-217.

BORGES, J.G.; NORDSTROM, E.M.; GARCIA-GONZALO, J.; HUJALA, T.; TRASOBARES A. 2014. Computer-Based Tools for Supporting Forest Management. The Experience and

the Expertise World-Wide; Department of Forest Resource Management, Swedish University of Agricultural Sciences: Umeå, Sweden, ISBN 978-91-576-9237-5

CANHAM, C.D.; MURPHY, L.E.; PAPAİK, M.; 2005. SORTIE-ND: Software for Spatially-Explicit Simulation of Forest Dynamics. Cary Institute of Ecosystem Studies: Millbrook, NY, USA.

CRISTAL, I., AMEZTEGUI, A., GONZÁLEZ-OLABARRIA, J.R., GARCIA-GONZALO, J. A. 2019. Decision Support Tool for Assessing the Impact of Climate Change on Multiple Ecosystem Services. *Forests* 10, 440.

De Caceres, M.; Martin-stpaul, N.' Turco, M.; Cabon, A., & Granda, V. 2018. Estimating daily meteorological data and downscaling climate models over landscapes. *Environmental Modelling and Software*, 108, 186–196.

GARCIA-GONZALO, J.; PELTOLA, H.; ZUBIZARRETA GERENDIAIN, A. & KELLOMÄKI, S. 2007. Impacts of forest landscape structure and management on timber production and carbon stocks in the boreal forest ecosystem under changing climate. *Forest Ecology and Management* 241(1–3), 243–257.

HANEWINKEL, M.; H. PELTOLA, P.; SOARES, & GONZÁLEZ-OLABARRIA, J. R. 2010. Recent approaches to model the risk of storm and fire to European forests and their integration into simulation and decision support tools. *Forest Systems*, 19(SI), 30–47.

LAROCQUE, G.R. 2015. Ecological Forest Management Handbook, 1st ed.; Larocque, G.R., Ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA.

MÄKELÄ, A.; LANDSBERG, J.; EK, A.R.; BURK, T.E.; TER-MIKAELIAN, M.; AGREN, G.I.; OLIVER, C.D.; PUTTONEN, P.; 2000. Process-based models for forest ecosystem management: Current state of the art and challenges for practical implementation. *Tree Physiol.* 20, 289–298.

NUTE, D.; POTTER, W.D.; MAIER, F.; WANG, J.; TWERY, M.; RAUSCHER, H.M.; KNOPP, P.; THOMASMA, S.; DASS, M.; UCHIYAMA, H. 2004. NED-2: An agent-based decision support system for forest ecosystem management. *Environ. Model. Softw.* 19, 831–843.

PIQUÉ, M.; BELTRÁN, M.; VERICAT, P.; CERVERA, T.; FARRIOL, R.; BAIGES, T.; 2011a. Models de gestió per als boscos de pi roig (*Pinus sylvestris* L.): producció de fusta i prevenció d'incendis forestals. Sèrie: Org. ed. Centredela Propietat Forestal. Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentacio i Medi Natural. Generalitat de Catalunya, Barcelona, Spain

REYER C.P.; BATHGATE S.; BLENNOW K.; BORGES J.G.; BUGMANN H.; DELZON S.; FAIAS S.P.; GARCIA-GONZALO J.; GARDINER B.; GONZALEZ-OLABARRIA J.R.; GRACIA C. 2017. Are forest disturbances amplifying or canceling out climate change-induced productivity changes in European forests? *Environmental Research Letters* 12(3), 034027.

TENZIN, J.; TENZIN, K.' & HASENAUER, H. 2017. Individual tree basal area increment models for broadleaved forests in Bhutan. *Forestry*, 90(3), 367–380.

TERRADAS, J. 2005. Forest dynamics: a broad view of the evolution of the topic, including some recent regional contributions. *Invest Agrar: Sist Recur* 14(3) 525–537.

WEISKITTEL AR; HANN DW; KERSHAW Jr. JR; VANCLAY JK; 2011. Forest Growth and Yield Modeling. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, UK

WIKSTRÖM, P.; EDENIUS, L.; ELFVING, B.; ERIKSSON, L.O.; LÄMÅS, T.; SONESSON, J.; ÖHMAN, K.; WALLERMAN, J.; WALLER, C.; KLINTEBÄCK, F. 2011. The Heureka Forestry Decision Support System: An Overview. *Mathematical & Computational Forestry & Natural Resource Sciences*. 3, 87–94.