

Proyecto HIDROFOREST. Madrid



REMP

Red Estatal de
Montes Públicos



Plan de Recuperación,
Transformación
y Resiliencia



Financiado por
la Unión Europea
NextGenerationEU

REMP cuenta con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea - NextGenerationEU.

Proyecto Hidroforest. Madrid

Breve Resumen

El proyecto HIDROFOREST desarrolla un sistema integral de cuantificación, evaluación y seguimiento ecohidrológico en las cerca de 50 000 ha de masas arboladas de la cuenca del río Lozoya (Madrid). Mediante una red de parcelas instrumentadas y un gemelo digital, permite optimizar la gestión forestal para maximizar funciones como la regulación hídrica, retención, provisión de agua y uso eficiente, generando adicionalidad en los servicios ecosistémicos.

Contexto

Los bosques de cabecera de cuenca desempeñan un papel fundamental en la provisión, regulación y protección de los recursos hídricos y de los servicios ecosistémicos asociados al agua. La cuenca del río Lozoya, en la Sierra Norte madrileña, es el origen de más de 600 hm³ de agua almacenada en sus embalses, representando el 64% de los recursos gestionados por el Canal de Isabel II y el 40% del abastecimiento hídrico de la población madrileña.

Las cerca de 50.000 ha de masas arboladas de la cuenca —dominadas por pinares de *Pinus sylvestris* y robledales de *Quercus pyrenaica*— presentan un potencial elevado para aumentar la provisión de agua mediante una gestión forestal activa y orientada ecohidrológicamente. Sin embargo, dicha gestión carece hasta la fecha de un sistema de indicadores robusto que permita cuantificar y evaluar la adicionalidad de las intervenciones selvícolas sobre las distintas funciones hidrológicas.

A esto se suma la creciente variabilidad climática, que intensifica la necesidad de una gestión adaptativa orientada a preservar y mejorar los servicios ecosistémicos. El proyecto HIDROFOREST, impulsado por la Dirección General de Biodiversidad y Gestión Forestal de la Comunidad de Madrid, surge como la primera iniciativa española en dar respuesta a este reto, articulando ciencia, tecnología y gestión forestal en un marco ecohidrológico integrado.

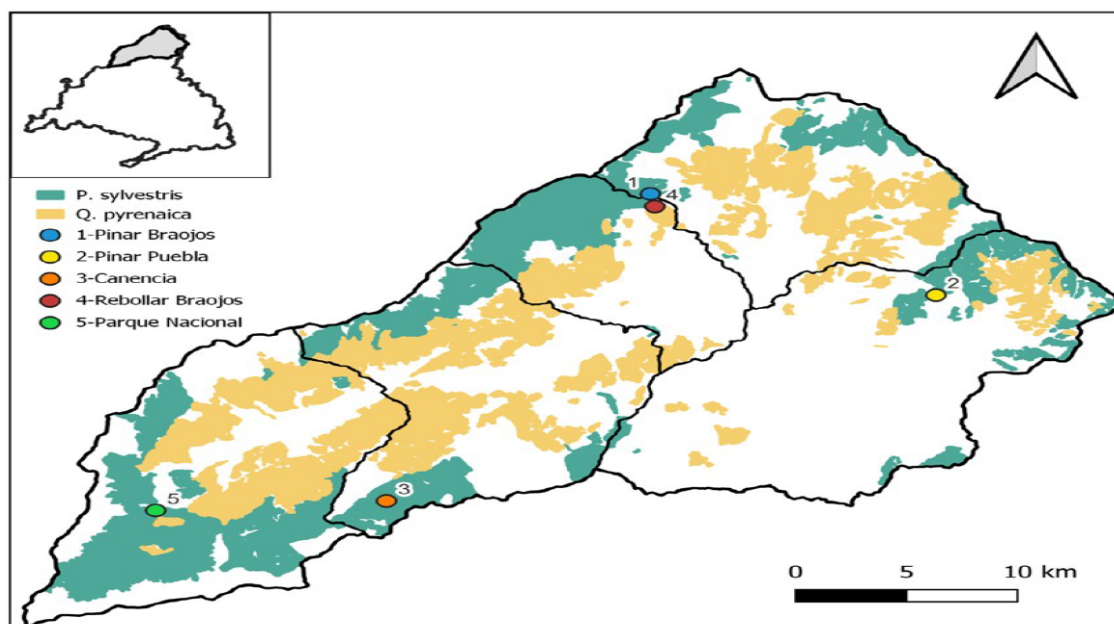


Figura 1. Cuenca del Lozoya en la sierra Norte de Madrid con indicación de la distribución de las masas de pino silvestre y rebollo y localización de las cinco parcelas ecohidrológicas contempladas en el proyecto Hidroforest (Fte. Grupo de Investigación en Ciencia y Tecnología Forestal (RE-Forest))

Resumen

HIDROFOREST diseña e implementa un sistema integral de monitorización ecohidrológica en los bosques de la cuenca del río Lozoya, con el fin de informar y optimizar la gestión forestal en relación con cuatro funciones ecohidrológicas clave: regulación (RG), retención (RT), provisión (PR) y uso eficiente del agua (UE).

El sistema se articula en torno a una red de cinco parcelas experimentales representativas de las principales formaciones forestales de la cuenca —pinos puros y mixtos de *Pinus sylvestris* y robledales de *Quercus pyrenaica*— distribuidas en distintas situaciones ecohidrológicas y clases de edad. En cuatro de los cinco sitios se dispone de una unidad experimental con tratamiento selvícola (T) y otra sin tratamiento o control (C), con una superficie aproximada de 0,25 ha por unidad.

Cada parcela cuenta con una instrumentación exhaustiva que registra variables clave del sistema suelo-planta-atmósfera (SPAC): potencial hídrico y contenido volumétrico de agua del suelo a distintas profundidades, flujo de savia, potencial hídrico del tronco, crecimiento radial del árbol, precipitación neta, evapotranspiración potencial y caudal en microcuencas, entre otras. Los sensores, basados en el protocolo SDI-12, están controlados por dataloggers con telemetría remota.

A partir de los datos registrados, se calculan indicadores específicos para cada función ecohidrológica: tiempos de retraso y tránsito para RG; retención promedio del vuelo y suelo para RT; drenaje superficial, subsuperficial y profundo para PR; y eficiencia en el uso del agua (WUE) y productividad primaria neta (NPP) para UE.

El sistema se complementa con un gemelo digital que permite simular, extrapolar espacialmente y evaluar los efectos de la gestión forestal sobre el conjunto de la cuenca. **Los resultados contribuyen tanto al conocimiento científico como a la toma de decisiones en la gestión forestal multifuncional y adaptativa al cambio climático.**

Objetivos

El objetivo principal de HIDROFOREST es desarrollar y desplegar un sistema integral de cuantificación, evaluación y seguimiento ecohidrológico de las masas forestales en la cuenca del río Lozoya, que permita informar sobre los efectos de la gestión forestal y su adicionalidad en las funciones ecohidrológicas.

Los objetivos específicos son:

1. Identificar y caracterizar las principales funciones ecohidrológicas de los bosques de la cuenca del Lozoya —regulación, retención, provisión y uso eficiente del agua— y asociarlas a servicios ecosistémicos y objetivos de gestión forestal.
2. Derivar un conjunto robusto de indicadores de evaluación y seguimiento de cada función ecohidrológica, evaluables tanto desde datos de campo como mediante modelos ecohidrológicos.
3. Desplegar una red de parcelas experimentales instrumentadas que permita cuantificar la adicionalidad de los tratamientos selvícolas sobre las funciones ecohidrológicas.
4. Desarrollar un gemelo digital de la cuenca para la simulación y extrapolación espacial de los indicadores definidos.

Metodología

Área de estudio y formaciones forestales

El proyecto se desarrolla en la cuenca del río Lozoya (924,9 km²), integrada en la comarca de la Sierra Norte madrileña. La cuenca abarca varios pisos bioclimáticos, con predominio de pinares de *Pinus sylvestris* (~17.000 ha) y robledales de *Quercus pyrenaica* (~17.000 ha). Los pinares silvestres guadarrámicos se distribuyen entre los 1.200 y 1.800 m, con sequía estival como factor de riesgo diferencial. Los melojares se extienden entre 1.200 y 1.600 m, con estructura de monte bajo o medio, siendo el resalveo y las cortas al uso las intervenciones selvícolas más habituales.

Red de parcelas ecohidrológicas

Se han seleccionado cinco casos de estudio que cubren las principales situaciones ecohidrológicas de la cuenca: una parcela en masa pura de rebollo con resalveo (Brajos_QUPY), dos en masas mixtas pinar-rebollar (Canencia y Rascafría-Parque

Natural) y dos en repoblaciones maduras de silvestre con tratamientos de mejora y regeneración (Braojos_PISY y La Puebla). En cuatro de los cinco sitios se dispone de parcelas pareadas con tratamiento (T) y control (C), de 0,25 ha cada una. La parcela de Rascafría, en zona protegida, funciona exclusivamente como referencia de no intervención.

Sensorización ecohidrológica

El seguimiento ecohidrológico en cada parcela se basa en el registro continuo de variables en los tres compartimentos del sistema SPAC. En el suelo se mide el potencial hídrico matricial (Teros 22), el contenido volumétrico de agua a 8, 25 y 50 cm (TDR CS655) y la altura piezométrica (transductores de presión), con frecuencia de muestreo de 10 minutos. La estructura del subsuelo se determina mediante tomografía eléctrica de resistividad y sísmica de refracción. En planta se monitoriza el flujo de savia (Implexx SFM), el contenido volumétrico de agua del tronco, el potencial hídrico (Scholander y PSY1/FloraPulse) y el crecimiento radial (dendrómetros). En el compartimento atmósfera, una estación climática completa registra precipitación, temperatura, humedad, radiación, viento y variables derivadas para el cálculo de la evapotranspiración potencial (FAO-Penman-Monteith). Se instalan aforadores Parshall con sensor sónico en los cauces próximos. Todos los sensores emplean el protocolo SDI-12 y los datos se descargan en remoto mediante telemetría centralizada.

Selección de indicadores

Los indicadores se seleccionan atendiendo a criterios de robustez física, evaluabilidad directa desde campo, simulabilidad mediante modelos ecohidrológicos y cobertura de los grupos fundamentales del ecosistema (agua, materia, energía y estructura). El contenido volumétrico de humedad del suelo (θ) constituye la variable central, por su papel articulador en los procesos ecohidrológicos y su estimabilidad mediante teledetección y redes internacionales de referencia.

Resultados

Identificación de procesos y variables ecohidrológicos

La valoración de las cuatro funciones ecohidrológicas ha permitido identificar los procesos más relevantes en cada una. La infiltración emerge como proceso transversal y prioritario en todas las funciones: su maximización es un objetivo común independientemente de la función hidrológica de referencia. En consecuencia, los indicadores de la primera fase del proyecto se fundamentan en el contenido de humedad del suelo (θ), variable que articula los procesos de regulación de energía, agua y nutrientes y que puede calcularse físicamente, simularse con modelos, estimarse desde información satelital y obtenerse directamente in situ.

Indicadores por función ecohidrológica

Para la **función de regulación (RG)** se han definido cinco indicadores: tiempo de retraso entre lluvia y respuesta del suelo superficial (RG1), tiempo de tránsito o drenaje hasta alcanzar la capacidad de campo desde saturación (RG2), regulación disponible en suelo ante lluvias intensas en mm (RG3), regulación relativa disponible en porcentaje (RG4) y tasa de regulación global como cociente entre almacenamiento y lluvia intensa (RG5).

Para la **función de retención (RT)** se han establecido cuatro indicadores: retención promedio del vuelo derivada del contenido volumétrico de agua del tronco (RT1), retención promedio del suelo integrada en el perfil (RT2), retención promedio relativa del suelo (RT3) y propensión a sequías súbitas en días/año, siguiendo el método de Ford y Labosier (2017) (RT4).

Para la **función de provisión (PR)** se definen cuatro indicadores basados en la dinámica de θ : escorrentía o drenaje superficial rápido (PR1), drenaje subsuperficial o hipodérmico (PR2), drenaje profundo mediante el método Drainage from Drydown (PR3) y tasa de agua azul como fracción de la lluvia total convertida en escorrentía y drenaje (PR4).

Para la **función de uso eficiente del agua (UE)** se han propuesto tres indicadores: eficiencia en el uso del agua (WUE) como cociente entre ganancia de carbono y transpiración (UE1), tasa de agua verde o fracción de la lluvia transpirada biológicamente (UE2) y productividad primaria neta (NPP) obtenida a partir de dendrómetros digitales y datos alométricos (UE3).

Los sensores instalados han demostrado ser robustos para monitorizar el contenido y la dinámica del agua en el ecosistema forestal. No obstante, se identifica la necesidad de definir nuevos umbrales de comportamiento de los indicadores y de avanzar en la extrapolación espacial mediante simulación, productos satelitales de humedad del suelo y sistemas de asimilación de datos.

Validación y Monitorización.

La validación de los indicadores se abordará de forma progresiva verificando: representación clara del indicando, relaciones de causa-efecto relevantes, sensibilidad óptima y adecuación espacio-temporal. El seguimiento se realiza mediante la red permanente de parcelas instrumentadas con sensores SDI-12 y telemetría remota, que proporciona datos en tiempo real. Los resultados se contrastarán con publicaciones científicas nacionales e internacionales y con la calibración local de modelos ecohidrológicos que permiten evaluar la efectividad de los tratamientos selvícolas aplicados.

Número de réplicas y/o escalado.

El proyecto opera sobre cinco parcelas experimentales con diseño pareado tratamiento/control (cuatro sitios con réplica), lo que aporta una base empírica sólida a escala de parcela y ladera. El escalado espacial al conjunto de la cuenca (~50.000 ha) se realiza mediante un gemelo digital que integra modelos ecohidrológicos y teledetección. A largo plazo, el sistema de indicadores y la metodología están concebidos para ser transferibles a otras cuencas hidrológicas de cabecera en España con características similares.

Documentación Adjunta

Bibliografía

1. Andreasen, M.; Andreasen, L.A.; Jensen, K.H.; Sonnenborg, T.O.; Bircher, S.; 2013. *Estimation of Regional Groundwater Recharge Using Data from a Distributed Soil Moisture Network*. *Vadose Zone J.* 12, 1–18.
<https://doi.org/10.2136/vzj2013.01.0035>
2. Awada, H.; Sirca, C.; Marras, S.; Castellini, M.; Spano, D.; Pirastru, M.; 2024. *Modelling soil moisture and daily actual evapotranspiration: Integrating remote sensing surface energy balance and 1D Richards equation*. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 128, 103744.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.103744>
3. Carvalho-Santos, C.; Honrado, J.P.; Hein, L.; 2014. *Hydrological services and the role of forests: Conceptualization and indicator-based analysis with an illustration at a regional scale*. *Ecol. Complex.* 20, 69–80.
<https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2014.09.001>
4. 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*. *For. Ecol. Manag.* 438, 163–175.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.020>
5. Del Campo, A.D.; Otsuki, K.; Serengil, Y.; Blanco, J.A.; Yousefpour, R.; Wei, X.; 2022. *A global synthesis on the effects of thinning on hydrological processes: Implications for forest management*. *For. Ecol. Manag.* 519, 120324. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120324>
6. Dorigo, W. et al.; 2021. *The International Soil Moisture Network: serving Earth system science for over a decade*. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 25, 5749–5804. <https://doi.org/10.5194/hess-25-5749-2021>
7. Fernandes, T.J.G.; Del Campo, A.D.; Herrera, R.; Molina, A.J.; 2016. *Simultaneous assessment, through sap flow and stable isotopes, of water use efficiency (WUE) in thinned pines shows improvement in growth, tree-climate sensitivity and WUE, but not in WUEi*. *For. Ecol. Manag.* 361, 298–308. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.11.029>
8. Ford, T.W.; Labosier, C.F.; 2017. *Meteorological conditions associated with the onset of flash drought in the Eastern United States*. *Agric. For. Meteorol.* 247, 414–423. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.08.031>
9. Jalilvand, E.; Tajrishy, M.; Brocca, L.; Massari, C.; Ghazi Zadeh Hashemi, S.; Ciabatta, L.; 2018. *Estimating the drainage rate from surface soil moisture drydowns: Application of DfD model to in situ soil moisture data*. *J. Hydrol.* 565, 489–501. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.035>

10. Laio, F.; Porporato, A.; Fernandez-Illescas, C.P.; Rodriguez-Iturbe, I.; 2001. *Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress*. *Adv. Water Resour.* 24, 745–762.
[https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(01\)00007-0](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(01)00007-0)
11. Liu, X. et al.; 2024. *Light thinning effectively improves forest soil water replenishment in water-limited areas*. *J. Hydrol.* 637, 131408.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131408>
12. McCall, K.A. et al.; 2017. *Global characterization of surface soil moisture drydowns*. *Geophys. Res. Lett.* 44, 3682–3690.
<https://doi.org/10.1002/2017GL072819>
13. Molina, A.J.; Del Campo, A.D.; 2012. *The effects of experimental thinning on throughfall and stemflow: A contribution towards hydrology-oriented silviculture in Aleppo pine plantations*. *For. Ecol. Manag.* 269, 206–213.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.12.037>
14. Müller, F.; Burkhard, B.; Kandziora, M.; Schimming, C.; Windhorst, W.; 2013. *Ecological Indicators: Ecosystem Health*. In *Encyclopedia of Environmental Management*. Taylor and Francis: New York, 599–613.
15. Nagel, L.M. et al.; 2017. *Adaptive Silviculture for Climate Change: A National Experiment in Manager-Scientist Partnerships to Apply an Adaptation Framework*. *J. For.* 115, 167–178. <https://doi.org/10.5849/jof.16-039>
16. Porporato, A.; D'Odorico, P.; Laio, F.; Rodriguez-Iturbe, I.; 2003. *Hydrologic controls on soil carbon and nitrogen cycles. I. Modeling scheme*. *Adv. Water Resour.* 26, 45–58. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(02\)00094-5](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00094-5)
17. Rigby, J.R.; Porporato, A.; 2006. *Simplified stochastic soil-moisture models: a look at infiltration*. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 10, 861–871.
<https://doi.org/10.5194/hess-10-861-2006>
18. Rodriguez-Iturbe, I.; Porporato, A.; Laio, F.; Ridolfi, L.; 2001. *Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress*. *Adv. Water Resour.* 24, 695–705.
[https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(01\)00004-5](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(01)00004-5)
19. Seidl, R.; Spies, T.A.; Peterson, D.L.; Stephens, S.L.; Hicke, J.A.; 2016. *Searching for resilience: addressing the impacts of changing disturbance regimes on forest ecosystem services*. *J. Appl. Ecol.* 53, 120–129.
<https://doi.org/10.1111/1365-2664.12511>
20. Vandecasteele, I. et al.; 2018. *The Water Retention Index: Using land use planning to manage water resources in Europe*. *Sustain. Dev.* 26, 122–131.
<https://doi.org/10.1002/sd.1723>
21. Vorobeyskii, I.; Luong, T.T.; Kronenberg, R.; Petzold, R.; 2024. *High-resolution operational soil moisture monitoring for forests in central Germany*. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 28, 3567–3595.
<https://doi.org/10.5194/hess-28-3567-2024>

22. Wang, Y.; Del Campo, A.D.; Wei, X.; Winkler, R.; Liu, W.; Li, Q.; 2020. Responses of forest carbon and water coupling to thinning treatments from leaf to stand scales in a young montane pine forest. *Carbon Balance Manag.* 15, 24. <https://doi.org/10.1186/s13021-020-00159-y>
23. Wei, X.; Harper, R.; Liu, S.; 2023. Global reviews on forest management and provision of hydrological functions. *For. Ecol. Manag.* 536, 120903. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120903>
24. Wicki, A. et al.; 2020. Assessing the potential of soil moisture measurements for regional landslide early warning. *Landslides* 17, 1881–1896. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01400-y>
25. Winkel, G. et al.; 2022. Governing Europe's forests for multiple ecosystem services: Opportunities, challenges, and policy options. *For. Policy Econ.* 145, 102849. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2022.102849>
26. Wolfs, D.; Swinnen, E.; Van Hoolst, R.; Toté, C.; 2023. Copernicus Global Land Operations "Vegetation and Energy" CGLOPS-1. ESA-UE. Service Contract N° 941115–ISP–2021.

Cuadro Resumen

Tipología

ACTUACIONES DE MEJORA

- Restauración
- I + D + i

Ámbito

☒ Relacionadas con la gestión forestal en sí misma.	☒ Relacionadas con la gestión forestal y a la adaptación o mitigación al cambio climático.	☒ Relacionadas con la mejora o conservación de la biodiversidad.
---	--	--

Ubicación

CC. AA: Comunidad de Madrid

Municipio: Varios

Ámbito: Cuenca hidrológica del río Lozoya

Titular: comunidad de Madrid

Superficie: 50000 ha

Gestión: Dirección General de Biodiversidad y Gestión Forestal, Consejería de Medio Ambiente, Agricultura e Interior, Comunidad de Madrid

FIGURA DE PROTECCIÓN:

CERTIFICACIÓN DE LA GESTIÓN FORESTAL SOSTENIBLE.

GEORREFERENCIACIÓN: Latitud 40.9 N; longitud: 3.7 W

Fecha de implantación

En curso. Marco NextGenerationEU

Datos administrativos

Entidad promotora:

- D.G. de Biodiversidad y Gestión Forestal, Comunidad de Madrid.

Responsable. Datos contacto:

- Nombre Contacto Responsable B.P: Antonio D. Del Campo García. María Serrada Redondo
- Puesto que desempeña: Grupo de Investigación en Ciencia y Tecnología Forestal (RE-ForeST). Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de Valencia. Camí de Vera s/n, Valencia.
- Teléfono: 91 438 22 00
- Mail:

Palabras clave:

- Servicios ecosistémicos, provisión de agua, uso eficiente del agua, protección del suelo, regulación hidrológica, silvicultura ecohidrológica, gemelo digital