

MODELIZACIÓN INTELIGENTE PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE IA GEOESPACIAL

INTELLIGENT MODELLING FOR SUSTAINABLE FOREST BIOMASS MANAGEMENT USING GEOSPATIAL AI

Sarai COBAS MERINO¹, Darío LÓPEZ RAMOS², Jairo CALDERÓN MICAÑA³ y Ana-Belén GIL-GONZÁLEZ⁴

¹ AIR Institute. Salamanca, Castilla y León, España

✉ scobas@air-institute.com

 <https://orcid.org/0009-0006-8593-4444>

² AIR Institute. Salamanca, Castilla y León, España

✉ dlopezr@air-institute.com

 <https://orcid.org/0009-0007-0164-9054>

³ AIR Institute. Salamanca, Castilla y León, España

✉ jcalderon@air-institute.com

 <https://orcid.org/0009-0008-1887-8985>

⁴ Universidad de Salamanca. Salamanca, Castilla y León, España

✉ abg@usal.es

 <https://orcid.org/0000-0001-7235-6151>

RESUMEN: El proyecto DeepForest propone un enfoque basado en la integración de inteligencia artificial y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para apoyar la gestión sostenible de los recursos forestales mediante el aprovechamiento de la biomasa. El objetivo es identificar áreas con potencial de explotación forestal garantizando la regeneración a largo plazo de los ecosistemas. El marco metodológico combina técnicas de *machine learning* para la estimación de biomasa aérea con análisis geoespaciales orientados a la caracterización de la idoneidad forestal y la evaluación del potencial energético a escala local. Se han recopilado y preprocesado datos de inventarios forestales, variables climáticas y cobertura del suelo en la región de Castilla y León. La estimación preliminar de biomasa se aborda mediante modelos de Random Forest y XGBoost, mientras que se exploran técnicas de *clustering* no supervisado para identificar municipios con potencial para la localización de infraestructuras asociadas a

la biomasa. Los resultados iniciales muestran la viabilidad del enfoque propuesto, si bien la validación exhaustiva y la ampliación del análisis constituyen trabajo en curso.

Palabras clave: biomasa; machine learning; gestión forestal sostenible.

ABSTRACT: The DeepForest project proposes an approach based on the integration of artificial intelligence and Geographic Information Systems (GIS) to support the sustainable management of forest resources through the use of biomass. The aim is to identify areas with potential for forest exploitation while ensuring the long-term regeneration of ecosystems. The methodological framework combines machine learning techniques for estimating above-ground biomass with geospatial analyses aimed at characterising forest suitability and assessing energy potential at the local level. Data on forest inventories, climate variables and land cover in the region of Castile and León have been collected and pre-processed. Preliminary biomass estimation is addressed using Random Forest and XGBoost models, while unsupervised clustering techniques are explored to identify municipalities with potential for the location of biomass-related infrastructure. Initial results show the viability of the proposed approach, although comprehensive validation and expansion of the analysis are ongoing.

Keywords: biomass; machine learning; sustainable forest management.

1. INTRODUCCIÓN

En el contexto actual de emergencia climática y de redefinición de la soberanía energética en Europa, la biomasa forestal se ha consolidado como un recurso estratégico dentro del mix de energías renovables. La biomasa para energía siguió siendo la principal fuente renovable en la UE y representó alrededor del 59 % del consumo de energía renovable en 2021, según el último informe sobre bioenergía de la Comisión Europea [1].

La optimización del aprovechamiento de la biomasa forestal constituye, sin embargo, un desafío complejo que trasciende lo técnico y abarca dimensiones territoriales y socioeconómicas. En regiones como Castilla y León coexisten amplias áreas rurales afectadas por despoblación con zonas sometidas a elevada presión extractiva, lo que genera tensiones en la gestión sostenible de los recursos forestales. Datos oficiales muestran que el volumen de madera existente en los montes de Castilla y León alcanza cifras del orden de decenas de millones de metros cúbicos, lo que evidencia un alto potencial, pero también la necesidad de planificación y trazabilidad a escala regional [2].

A nivel normativo y estratégico, la actualización del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC 2023-2030) y la Directiva de Energías Renovables (RED III) refuerzan la necesidad de digitalización, trazabilidad y planificación avanzada en el sector de la bioenergía, exigiendo criterios de sostenibilidad y verificación a lo largo de la cadena de suministro [3, 4].

Adicionalmente, la literatura y las evaluaciones europeas muestran que existe un margen amplio de disponibilidad de recurso en Europa susceptible de aprovechamiento

sostenible —con estimaciones que sitúan la fracción de bosque potencialmente disponible para suministro en porcentajes elevados a escala continental— lo que sugiere que las limitaciones operativas (fragmentación de la propiedad, falta de datos, logística) son el principal cuello de botella para incrementar tasas de aprovechamiento [5].

En este contexto, el proyecto DeepForest propone un marco metodológico basado en la integración de técnicas de inteligencia artificial, teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para modernizar la planificación del aprovechamiento de la biomasa forestal. El objetivo es estimar biomasa aérea, identificar áreas con potencial de extracción sostenible, caracterizar la demanda energética local y optimizar la logística de abastecimiento, proporcionando herramientas de apoyo a la toma de decisiones para gestores y responsables públicos.

2. METODOLOGÍA

2.1. DATOS Y PREPROCESAMIENTO

El análisis se realizó sobre un conjunto heterogéneo de datos de Castilla y León, que incluye inventarios forestales, cobertura del suelo derivada de teledetección, variables climáticas (aridez, temperatura media, pluviometría) y registros de montes con Certificación Forestal Sostenible (públicos y privados). Todos los datos fueron normalizados y reproyectados a una malla espacial común para su integración en modelos de inteligencia artificial y análisis geoespacial.

2.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MÉTODO

El enfoque metodológico combina tres etapas principales: (i) estimación de la densidad forestal mediante segmentación de imágenes satelitales, (ii) agrupamiento de municipios según características ambientales y de cobertura forestal y (iii) cálculo de un índice de conveniencia que permite priorizar montes para un aprovechamiento sostenible de la biomasa. Las salidas incluyen un archivo .csv con atributos de los montes y un mapa interactivo que facilita la visualización y la consulta por parte de gestores territoriales.

2.3. MODELO DE DENSIDAD FORESTAL

La densidad forestal se estima mediante segmentación semántica de imágenes satelitales, formulada como predicción «pixel-wise» de la cobertura arbórea. Se evaluaron dos arquitecturas: U-Net y DeepLabV3+ (backbone ResNet-50) sobre un dataset de 800 pares imagen-máscara. Aunque DeepLabV3+ reprodujo mejor las máscaras de referencia, U-Net mostró mayor correlación con la cobertura real observada, identificando con precisión zonas arboladas y desarboladas, por lo que se seleccionó como modelo principal.

La evaluación se realizó mediante métricas de intersección sobre la unión (IoU) y F1 a nivel pixel y de parcela.

2.4. CLUSTERING Y CÁLCULO DE ÍNDICE DE CONVENIENCIA

Se aplicó *clustering* sobre vectores municipales que combinan variables climáticas y agregados de densidad forestal, descartando municipios no forestales (agricultura, urbano, cuerpos de agua). Posteriormente, se calculó un índice de conveniencia que integra variables relevantes como tipo de masa, tolerancia ecológica, pluviometría, temperatura y periodo frío. La formulación adoptada es: donde son las variables normalizadas y pesos asignables mediante técnicas de optimización. En la interpretación adoptada, valores cercanos a 0 indican mayor idoneidad para frondosas, valores cercanos a 1 para coníferas y valores intermedios para masas mixtas. Este índice se computa para montes públicos y privados certificados y sirve para filtrar y mapear franjas de prioridad de aprovechamiento sostenible.

2.5. RESULTADOS

Los resultados incluyen la selección de montes públicos y privados certificados, con sus atributos y puntaje de conveniencia, exportados a un fichero .csv. Además, se generó un mapa interactivo que muestra densidad forestal, clústeres municipales e índice de conveniencia, proporcionando una herramienta práctica de apoyo a la toma de decisiones en planificación territorial y energética.

3. PERSPECTIVAS Y PRÓXIMOS PASOS

Aunque los resultados presentados representan un avance inicial, el proyecto DeepForest seguirá desarrollando la evaluación de la demanda energética local y la estimación de la capacidad de producción de biomasa. Para ello se prevé utilizar modelos predictivos basados en Random Forest y XGBoost, junto con técnicas de optimización de rutas para mejorar la eficiencia en el abastecimiento de biomasa. La validación de las predicciones se realizará mediante datos de campo y teledetección multiespectral y LiDAR, contribuyendo a la consolidación de herramientas de planificación territorial y energética más precisas y sostenibles.

4. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación forma parte del Proyecto de Cátedra Internacional sobre Inteligencia Artificial Fiable y Reto Demográfico dentro de la Estrategia Nacional de Inteligencia Artificial (ENIA), en el marco del Plan Europeo de Recuperación, Transformación y

Resiliencia. Referencia: TSI-100933-2023-0001. Este proyecto está financiado por la Secretaría de Estado para la Digitalización y la Inteligencia Artificial y por la Unión Europea (Next Generation).

5. REFERENCIAS

1. European Commission. (2022). *Biomass for energy in the European Union (European Commission Report)*. European Commission.
2. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2022). *Inventario forestal de Castilla y León*. Gobierno de España.
3. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2023). *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2023-2030*. Gobierno de España.
4. European Commission. (2023). *Renewable Energy Directive (RED III)* (European Commission Report). European Commission.
5. Verkerk, P. H., Lindner, M., & Schelhaas, M.-J. (2012). Assessing forest availability for wood supply in Europe. *Forest Policy and Economics*, 17, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2011.11.003>