

zeinali, L.; Sohrabi, H.; Quiros, E.; Immitzer, M. Evaluación de los servicios ecosistémicos en los bosques templados de Hircania mediante la integración de datos de múltiples fuentes

Evaluación de los servicios ecosistémicos en los bosques templados de Hircania mediante la integración de datos de múltiples fuentes

Zeinali, Laya ¹ Sohrabi, Hormoz ¹ Quiros, Elia ² Immitzer, Markus ³

¹ Tarbiat Modares University, Irán

² Universidad de Extremadura, Escuela Politécnica, Cáceres, Spain.

³ BOKU University, Department of Ecosystem Management, Climate and Biodiversity, Institute of Geomatics, Vienna, Austria.

ORCID: [zeinali 0009-0000-5198-0211](https://orcid.org/0009-0000-5198-0211) [Sohrabi 0000-0001-6936-5292](https://orcid.org/0000-0001-6936-5292) [Quiros 0000-0002-8429-045X](https://orcid.org/0000-0002-8429-045X) [Immitzer 0000-0001-6758-1207](https://orcid.org/0000-0001-6758-1207)

Correspondencia: layazeinaliyadegari@gmail.com hormozsohrabi@gmail.com equiros@unex.es
markus.immitzer@boku.ac.at

RESUMEN

Los servicios ecosistémicos son un componente clave del capital natural y permiten evaluar la salud de los ecosistemas. Los ecosistemas forestales destacan por su producción de madera, captura de carbono y conservación de la biodiversidad, funciones que dependen en gran medida de su gestión. Los bosques hircanios, antiguos bosques templados situados en la costa sur del mar Caspio y reconocidos como Patrimonio Mundial por su alto valor ecológico, presentan gran diversidad y estructura compleja. Este estudio integró datos satelitales, LiDAR, variables topográficas y 2543 parcelas de campo para estimar el volumen de madera, biomasa aérea y carbono en más de dos millones de hectáreas. Se estimó un volumen en pie de 524 millones de m³, equivalente a 314,4 millones de toneladas de biomasa aérea, de las cuales 157,2 millones corresponden a carbono almacenado. Además, se calculó una producción de oxígeno de 419,4 millones de toneladas. El valor económico del almacenamiento de carbono se estimó en 2986 millones de dólares, y el potencial de producción de madera en 145 150 millones de dólares. Los resultados resaltan la gran importancia ecológica y económica de estos bosques y la necesidad de una gestión sostenible para preservar sus servicios ecosistémicos.


Palabras clave: Servicios ecosistémicos, Bosques Hircanios, cuantificación, modelización, teledetección.


Fecha de recepción: 20 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 20 febrero 2026

Evaluación de los servicios ecosistémicos en los bosques templados de Hircania mediante la integración de datos de múltiples fuentes


Zeinali Yadegari, Laya ⁽¹⁾, Sohrabi, Hormoz ⁽¹⁾, Quirós, Elia ⁽²⁾ Immitzer, Markus ⁽³⁾

⁽¹⁾ Department of Forest Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Irán.


 0009-0000-5198-0211, zeinaliyadegarilaya@modares.ac.ir

 0000-0001-6936-5292, hsohrabi@modares.ac.ir

⁽²⁾ Universidad de Extremadura, España.

 0000-0002-8429-045X, equiros@unex.es

⁽³⁾ Department of Ecosystem Management, Climate and Biodiversity, BOKU University, Austria.

 0000-0001-6758-1207, markus.immitzer@boku.ac.at

Resumen: Los servicios ecosistémicos son un componente clave del capital natural y permiten evaluar la salud de los ecosistemas. Los ecosistemas forestales destacan por su producción de madera, captura de carbono y conservación de la biodiversidad, funciones que dependen en gran medida de su gestión. Los bosques hircanios, antiguos bosques templados situados en la costa sur del mar Caspio y reconocidos como Patrimonio Mundial por su alto valor ecológico, presentan gran diversidad y estructura compleja. Este estudio integró datos satelitales, LiDAR, variables topográficas y 2543 parcelas de campo para estimar el volumen de madera, biomasa aérea y carbono en más de dos millones de hectáreas. Se estimó un volumen en pie de 524 millones de m³, equivalente a 314,4 millones de toneladas de biomasa aérea, de las cuales 157,2 millones corresponden a carbono almacenado. Además, se calculó una producción de oxígeno de 419,4 millones de toneladas. El valor económico del almacenamiento de carbono se estimó en 2986 millones de dólares, y el potencial de producción de madera en 145 150 millones de dólares. Los resultados resaltan la gran importancia ecológica y económica de estos bosques y la necesidad de una gestión sostenible para preservar sus servicios ecosistémicos.

Palabras clave: Servicios ecosistémicos, Bosques Hircanios, cuantificación, modelización, teledetección.

Ecosystem Services Evaluation in the Hyrcanian Temperate Forests using Multi-Source Data Integration

Abstract: *Ecosystem services are a key component of natural capital and enable the health of ecosystems to be assessed. Forest ecosystems are notable for their production of wood, carbon sequestration, and biodiversity conservation, functions that depend largely on how they are managed. The Hyrcanian forests, ancient temperate forests located on the southern coast of the Caspian Sea and recognized as World Heritage Sites for their high ecological value, are highly diverse and complex in structure. This study integrated satellite data, LiDAR, topographic variables, and 2,543 field plots to estimate the volume of wood, above-ground biomass, and carbon in more than two million hectares. A standing volume of 524 million m³ was estimated, equivalent to 314.4 million tons of above-ground biomass, of which 157.2 million tons correspond to stored carbon. In addition, oxygen production was calculated at 419.4 million tons. The economic value of carbon storage was estimated at \$2.986 billion, and the potential for wood production at \$145.15 billion. The results highlight the great ecological and economic importance of these forests and the need for sustainable management to preserve their ecosystem services.*

Keywords: *Ecosystem Services, Hyrcanian Forests, Quantification, Modeling, Remote Sensing.*

1. INTRODUCCIÓN

Los servicios ecosistémicos se refieren a los bienes y beneficios que proporcionan los ecosistemas en condiciones de integridad ecológica y estabilidad

funcional y que contribuyen directamente al bienestar humano. La valoración de los servicios ecosistémicos constituye un marco analítico que genera pruebas cuantitativas sobre la importancia económica y funcional de los bienes y servicios ecosistémicos, lo que ayuda a

los planificadores y responsables de la toma de decisiones en la gobernanza ambiental, económica y social. Según el marco de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio, los servicios ecosistémicos se clasifican en cuatro categorías principales: servicios de aprovisionamiento, regulación, culturales y de apoyo (MEA, 2005).

Los ecosistemas forestales desempeñan un papel fundamental en la prestación de servicios ecosistémicos; sin embargo, las presiones antropogénicas, como la deforestación, la fragmentación del hábitat y la expansión agrícola, suponen una amenaza considerable para su integridad. La evaluación oportuna y coherente de los servicios ecosistémicos puede servir como un sustituto eficaz para evaluar el estado de los ecosistemas y la salud ecológica.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) recomienda integrar datos de observación de la Tierra con mediciones de campo para estimar la superficie forestal y las reservas de carbono, mejorando la valoración de los servicios ecosistémicos (Espejo, 2020). Dado que los estudios de campo presentan limitaciones, las imágenes satelitales de alta resolución y su integración con datos de inventario permiten desarrollar modelos forestales robustos (Tian *et al.*, 2023). Sin embargo, en Irán, y especialmente en los bosques hircanos, su aplicación sigue siendo limitada, sin existir un análisis integral que cuantifique conjuntamente la producción de madera y la captura de carbono; este estudio contribuye a cubrir dicho vacío mediante la integración de datos satelitales y de campo.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

Los bosques de Hircania, un patrimonio natural de varios millones de años de antigüedad situado a lo largo de la costa sur del mar Caspio, representan uno de los vestigios más singulares de los antiguos bosques templados de hoja ancha. Estos bosques se caracterizan por estructuras de rodales de edades desiguales, una gran riqueza de especies, una estratificación vertical compleja y una marcada heterogeneidad horizontal (Sagheb-Talebi *et al.*, 2014; Sohrabi, 2025). Las especies con más presencia en el área son: *Fagus orientalis*, *Carpinus betulus*, *Quercus castaneifolia* y *Alnus subcordata*. Se extienden desde el nivel del mar hasta aproximadamente 2800 metros sobre el nivel medio del mar y abarcan un amplio espectro de zonas ecológicas (Figura 1).

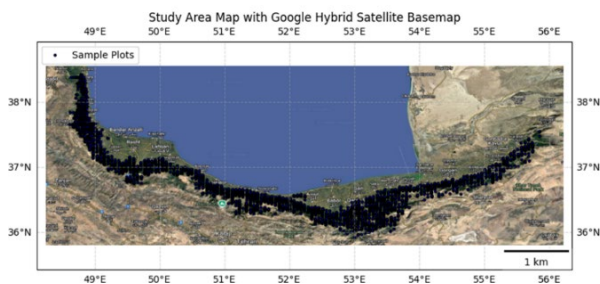


Figura 1. Área de estudio al sur del mar Caspio.

2.2. Datos de campo y estimación de la biomasa y el carbono

Los datos de referencia se obtuvieron del Inventario Forestal Nacional (NFI) de 2023, basado en una red sistemática de parcelas circulares de 1.000 m² distribuidas en una malla de 1 × 5 km, con un total de 2.543 parcelas, en las que se midió el DBH de todos los árboles y la altura de individuos representativos, estimándose el resto mediante modelos altura-diámetro y permitiendo derivar métricas estructurales adicionales como percentiles de altura. La altura y el diámetro a la altura del pecho (DBH) de los árboles se recopilaron y procesaron en Excel. Se aplicaron ecuaciones de volumen específicas para cada especie, calibradas para las condiciones del bosque hircaniano, con el fin de estimar el volumen de cada árbol. El volumen estimado del tronco se convirtió en biomasa aérea utilizando un factor de expansión de la biomasa (BEF) de 0,6. Este coeficiente compuesto refleja la densidad media de la madera y las características de expansión de la biomasa en las condiciones del estudio. A continuación, se estimó el stock de carbono utilizando un factor de conversión de carbono (CCF) de 0,5, un valor por defecto ampliamente aceptado y recomendado en las Directrices del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (IPCC, 2006). La producción anual de madera se calculó como el 1 % del volumen en pie, de acuerdo con las normas de gestión forestal. La producción de oxígeno se estimó utilizando la relación estequiométrica entre la fijación de carbono y la liberación de oxígeno durante la fotosíntesis. Concretamente, cada gramo de carbono fijado en la biomasa vegetal corresponde a 2,67 gramos de oxígeno liberado, derivado de la relación de masa atómica del oxígeno (32) y el carbono (12), tal y como se adopta en los marcos metodológicos del IPCC (IPCC, 2006).

2.3. Datos de teledetección

Este estudio empleó un enfoque multisensor que integraba conjuntos de datos ópticos, de radar y LiDAR espaciales. Las características estructurales y espectrales se obtuvieron a partir de imágenes de Sentinel-1 y Sentinel-2, correspondientes principalmente al año 2023 y organizadas en composiciones estacionales (primavera, verano, otoño e invierno).

Tabla 1. Datos de teledetección y características extraídas

| | Fuente | Variables Extraídas |
|---|------------|---|
| 1 | Sentinel-1 | VV + VH + Texturas (derivadas de la matriz de co-ocurrencia de niveles de gris, incluyendo varias métricas de Haralick) |
| 2 | Sentinel-2 | Bandas + índices vegetación (con cálculo de múltiples índices espectrales, en un orden de magnitud de varios índices) |
| 4 | GEDI | el_highestreturn + el_lowestmode + RH |
| 5 | SRTM | Elevación + pendiente + orientación |
| 6 | LULC | |

Las métricas tridimensionales de la estructura del dosel, incluidos los parámetros de altura del dosel, se obtuvieron de la misión GEDI LiDAR para reforzar el vínculo entre las observaciones sobre el terreno y los datos satelitales. Los conjuntos de datos auxiliares incluyeron la misión Landsat 8, el modelo digital de elevación (DEM) SRTM y los mapas de uso y cobertura del suelo (LULC) para mejorar el rendimiento y la interpretabilidad de la modelización espacial.

2.4. Modelado de aprendizaje automático

Se implementaron y compararon cinco algoritmos de regresión de aprendizaje automático, entre ellos Random Forest, Support Vector Regression, k-Nearest Neighbors, Linear Regression y XGBoost. Estos algoritmos se seleccionaron por su gran capacidad para modelar relaciones no lineales, su solidez frente a datos ruidosos y su gran capacidad de generalización en el análisis de conjuntos de datos de teledetección. Para garantizar un equilibrio entre la precisión del modelo y la eficiencia computacional, el conjunto de datos se dividió en un 70 % para el entrenamiento y un 30 % para la validación. El objetivo del modelado fue la predicción del volumen de madera, a partir del cual se estimaron posteriormente la biomasa aérea y el carbono forestal mediante factores de expansión y conversión. Para evaluar el rendimiento del modelo, se utilizaron indicadores estadísticos estándar, incluyendo el coeficiente de determinación (R^2), el error cuadrático medio (RMSE) y el error absoluto medio (MAE). El preprocesamiento espacial se llevó a cabo en QGIS. El procesamiento de teledetección y la extracción de variables se realizaron en Google Earth Engine (GEE). El modelado de aprendizaje automático y los análisis estadísticos se implementaron en Python.

2.5. Valoración económica

El secuestro de carbono se valoró utilizando los informes de 2025 del Banco Mundial (Estado y tendencias de los precios del carbono en 2025) y del I4CE (Cuentas globales de carbono en 2025). El precio medio mundial del carbono para 2025 era de aproximadamente 19 dólares estadounidenses por tonelada. La valoración de la madera se obtuvo a partir de referencias del mercado internacional, incluidos los conjuntos de datos de Globalwood, la OIMT, el Banco Mundial y Eurostat. Se adoptó un precio de referencia de 277 dólares estadounidenses por metro cúbico. Se generaron mapas de valoración económica espacialmente explícitos integrando los mapas de producción de madera con los precios de referencia del mercado a escala de píxeles y de unidades de gestión.

3. RESULTADOS

Según las estimaciones finales de los bienes y servicios ecosistémicos de todos los bosques hircanos que se presentan en la Tabla 2, el volumen total de los bosques es de aproximadamente 524 millones m^3 , una cantidad que refleja las características estructurales, la alta estabilidad ecológica y la diversidad de especies de estos bosques. Este elevado volumen ha dado lugar directamente a una cantidad sustancial de biomasa aérea (aproximadamente 2 933 969,63 toneladas), una

cifra que indica que los bosques hircanos representan uno de los depósitos de biomasa más importantes de Oriente Medio y la región del Cáucaso. Una alta biomasa conduce naturalmente a una enorme capacidad de almacenamiento de carbono. La estimación realizada muestra que el carbono total almacenado en la cubierta arbórea de Hyrcanian es de aproximadamente 1,46 millones de toneladas. Esta cantidad de carbono almacenado desempeña un papel fundamental en la regulación del ciclo del carbono, la mitigación del cambio climático y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. La cantidad total de oxígeno producido se ha estimado en aproximadamente 3 916 849,46 toneladas, un valor que demuestra la importancia vital de estos bosques para la sostenibilidad biológica y su papel fundamental en el mantenimiento de la salud ecológica de la región. El valor monetario del carbono almacenado se ha calculado en aproximadamente 2780 millones de unidades monetarias, y el valor económico de la producción maderera se ha estimado en aproximadamente 1350 millones. El modelo seleccionado para la estimación del volumen (base de los cálculos posteriores) presentó un rendimiento adecuado, con valores de $R^2=0,54$, $RMSE=8,09$ y $MAE=5,91$ en el conjunto de validación. Los valores totales cuantificados y la valoración económica de los servicios ecosistémicos de los bosques hircanos de dicho modelo se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores totales cuantificados y valor económico de los servicios ecosistémicos de los bosques hircanos

| | Total |
|---|-----------------|
| Volumen total en pie (m^3) | 524 000 000 |
| Biomasa total en la tierra (t) | 314 400 000 |
| Carbono vivo leñoso total en tierra (t) | 157 200 000 |
| Oxígeno total producido (t) | 419 424 000 |
| Precio total del carbono (dólares) | 2 986 800 000 |
| Precio total de la producción de madera (dólares) | 145 148 000 000 |

Los mapas de distribución espacial de los servicios estimados de secuestro de carbono y producción de madera se muestran en las figuras 2 y 3. Estos dos servicios muestran una relación sinérgica positiva, de modo que cuando uno aumenta, el otro también lo hace. El patrón espacial de ambos servicios indica que los valores más altos se observan en la parte occidental de la región, mostrando una tendencia gradual a la baja hacia las zonas orientales.

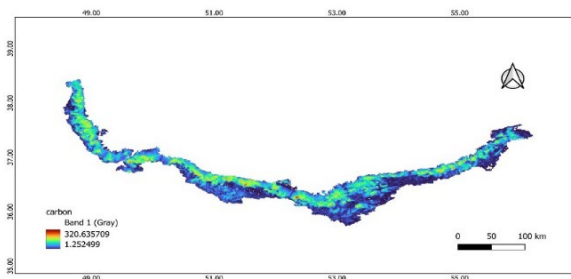


Figura 2. Patrón de distribución espacial del secuestro de carbono en los bosques de Hircania.

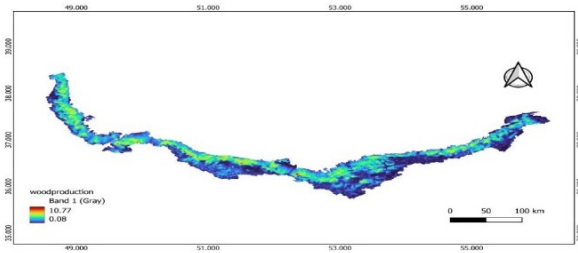


Figura 3. Patrón de distribución espacial de la producción maderera en los bosques de Hircania.

4. DISCUSIÓN

Los servicios ecosistémicos estimados se han considerado indicadores clave para evaluar y gestionar los recursos forestales. La falta de modelos fiables y completos y las limitaciones estadísticas de los modelos existentes han creado una importante laguna en el conocimiento sobre las reservas forestales y requieren el desarrollo de modelos capaces de estimar con precisión estas cantidades para diferentes tipos de bosques (Tian *et al.*, 2023).

En comparación con estudios anteriores sobre los bosques de Hircania, el presente estudio aporta un valor añadido único debido a su mayor extensión espacial y al mayor tamaño de la muestra. Los resultados muestran que el modelo basado en datos multitemporales de Sentinel-2 y entrenado con datos GEDI presenta un mejor ajuste en R^2 y menores errores RMSE en comparación con otros enfoques evaluados, especialmente en la estimación de alturas y variables estructurales del dosel, sin que en este trabajo se realice una comparación sistemática entre modelos mono- y multisensoriales. Estos hallazgos concuerdan con los de Ronoud *et al.* (2024).

La combinación de datos LiDAR de GEDI, Sentinel-2, Landsat y algoritmos de aprendizaje automático como Random Forest proporciona una gran capacidad para estimar los servicios ecosistémicos. Los estudios de Gupta y Sharma (2022) demostraron que el uso de datos LiDAR GEDI espaciales junto con imágenes multiespectrales y datos de radar, y la aplicación de modelos de aprendizaje automático, es un método eficaz para la cartografía forestal en grandes áreas.

5. CONCLUSIONES

Los resultados cuantitativos ofrecen una visión integrada del almacenamiento de biomasa, la captura de carbono y el valor económico de los servicios ecosistémicos de los bosques hircanos. La valoración económica resalta su importancia estratégica en el contexto de la economía ambiental y el mercado global del carbono, incluyendo oportunidades para políticas como REDD+. Sin embargo, la dependencia de la explotación maderera no es sostenible a largo plazo, ya que puede comprometer el almacenamiento de carbono y la integridad ecológica del bosque. Gran parte de su valor real reside en servicios intangibles como la regulación climática, la biodiversidad y la producción de oxígeno.

En conjunto, los bosques hircanos constituyen no solo un patrimonio natural mundial, sino también un activo clave para la seguridad ecológica y la economía verde del país.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Organización de Recursos Naturales y Gestión de Cuencas de Irán por facilitar parcialmente el acceso a los datos de campo utilizados en este estudio.

7. REFERENCIAS

- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: Current state and trends*. Island Press.
- IPCC. (2006). *IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Volume 4: Agriculture, forestry and other land use (AFOLU)*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Espejo, A., Federici, S., Green, C., Amuchastegui, N., d'Annunzio, R., Balzter, H., Bholanath, P., Brack, C., Brewer, C., & Birigazzi, L. (2020). *Integration of remote-sensing and ground-based observations for estimation of emissions and removals of greenhouse gases in forests: Methods and guidance from the Global Forest Observations Initiative (3rd ed.)*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Sagheb-Talebi, K., Sajedi, T., & Pourhashemi, M. (2014). *Forests of Iran*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7371-4>
- Sohrabi, H. (2025). Does UNESCO designation enhance forest protection? Evidence from the Hyrcanian national forest inventory. *Trees, Forests and People*, 21, 100956. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2025.100956>
- Ronoud, G., Darvishsefat, A. A., Poorazimy, M., Tomppo, E., Antropov, O., & Praks, J. (2024). Enhancing Hyrcanian forest height and aboveground biomass predictions: A synergistic use of TanDEM-X InSAR coherence, Sentinel-1, and Sentinel-2 data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17, 8409–8423. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3383777>
- Gupta, R., & Sharma, L. K. (2022). Mixed tropical forests canopy height mapping from spaceborne LiDAR GEDI and multisensor imagery using machine learning models. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 27, 100817. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100817>
- Tian, L., Wu, X., Tao, Y., Li, M., Qian, C., Liao, L., & Fu, W. (2023). Review of remote sensing-based methods for forest aboveground biomass estimation: Progress, challenges, and prospects. *Forests*, 14(6), 1–31. <https://doi.org/10.3390/f14061086>