

Geoinformática y cartografía del carbono en la biomasa aérea para Entre Ríos

Geoinformatics and Carbon Mapping of Aboveground Biomass in Entre Ríos

Evequoz González Garmendia, Alan*; Piani, Virginia Alejandra*;
Maccarrone, María Juliana♦ y Lisandra Pamela Zamboni♦



Fecha de recepción: 03/11/2025

Fecha de aceptación: 01/12/2025

Resumen

La estimación del carbono almacenado en la biomasa aérea es fundamental para evaluar el rol de los ecosistemas de Entre Ríos en la mitigación del cambio climático. Este trabajo analiza su distribución espacial mediante la integración de Biomass cci v5 (ESA, 2010–2021) y la cartografía de cobertura y uso del suelo de MapBiomas Argentina, sobre infraestructura de cómputo en la nube recomendada para el manejo de grandes volúmenes de datos. La información fue reclasificada y vinculada a ecorregiones, cuencas hidrográficas y departamentos, estimando el carbono como $C = B * 0,5$. Se compilaron 254 registros de campo y bibliografía regional para validar los resultados. Menos del 2 % del territorio supera los 50 Mg C /ha, mientras que el 38 % presenta valores ≤ 5 Mg C /ha y el 21,18 % registra menos de 1 Mg C/ha. Las pruebas estadísticas revelan discrepancias significativas entre Biomass_cci y los datos de campo, lo que subraya la necesidad de ajustes locales de los productos globales; sin embargo, los productos globales resultan útiles para interpretar patrones espaciales y apoyar el ordenamiento territorial y las estrategias de manejo sostenible de la tierra.

Palabras clave: “ESA CCI Biomass”; “Ecorregiones”; “Cobertura y uso del suelo”; “Captura de Carbono”; “Biomasa Aérea Total”.

Abstract

Estimating carbon stored in aboveground biomass is essential for assessing the role of Entre Ríos ecosystems in climate-change mitigation. This study analyzes its spatial distribution by integrating Biomass_cci v5 (ESA, 2010–2021) with land-cover and land-use mapping from

* Becario Doctoral CONICET-INAUBEPRO. Centro Regional de Geomática, FCyT-UADER, Oro Verde. Dirección de contacto: evequoz.alan@uader.edu.ar

♦ Docente Investigadora. Centro Regional de Geomática. FCyT-UADER, Oro Verde.

♦ Docente e Investigadora Asistente CONICET. Centro para la Gestión Local Sostenible del Agua y del Hábitat Humano. FCyT-UADER, Oro Verde.

MapBiomas Argentina, reprocessed in GIS and cloud-based computing infrastructure to accelerate calculation and manage large data volumes. The information was reclassified into a ~90 m grid and linked to ecoregions, hydrographic basins, and administrative departments, estimating carbon as $C = B * 0.5$. A total of 254 field records and regional literature sources were compiled to validate the results. Fewer than 2% of the territory exceed 50 Mg C/ha, while 38% falls below 15 Mg C/ha and 21.18% contains less than 1 Mg C/ha. Statistical tests revealed significant discrepancies between Biomass_cci and field measurements, highlighting the need for local calibration; however, global products remain useful for interpreting spatial patterns, supporting territorial planning, and informing sustainable land-management strategies.

Keywords: “*ESA CCI Biomass*”; “*Ecoregions*”; “*Land Use Land Cover*”; “*Carbon sequestration*”; “*Total Aerial Biomass*”.

Introducción

La captura y el almacenamiento de carbono en ecosistemas terrestres son esenciales para mitigar el cambio climático, ya que estos sistemas actúan como sumideros que absorben dióxido de carbono (CO_2) atmosférico, reduciendo la concentración de este gas de efecto invernadero (GEI) (Legg, 2021). Dentro de estos ecosistemas, los bosques desempeñan un papel crucial debido a su alta capacidad de almacenamiento de carbono en la biomasa y en el suelo, lo que los convierte en aliados estratégicos en la regulación del clima global (Mo et al., 2023).

La biomasa aérea (AGB, por sus siglas en inglés) es uno de los principales compartimentos donde se almacena el carbono en los ecosistemas terrestres, y su estudio es fundamental para comprender la dinámica del carbono, debido a su relación directa con los ciclos biogeoquímicos (IPCC, 2003; IPCC, 2006). La biomasa aérea incluye todos los componentes vivos sobre el suelo, como troncos, ramas, hojas y corteza, que representan la mayor fracción de la biomasa total en los bosques (Brown, 1997). Por lo tanto, su estimación presenta menos desafíos logísticos en comparación con otros compartimentos, como la biomasa subterránea o el carbono orgánico del suelo, lo que facilita su medición y análisis a escala regional (Gasparri y Manghi, 2004).

El análisis de los patrones espaciales de captura y almacenamiento de carbono es especialmente relevante en el contexto del cambio climático, ya que permite comprender la dinámica de los sumideros de carbono y su interacción con los usos del suelo (IPCC, 2006; Aceñolaza et al., 2007; Legg, 2021; Piani, 2024). Además, esta información resulta clave para la definición de estrategias de conservación y gestión de los servicios ecosistémicos, favoreciendo la resiliencia de los ecosistemas y su capacidad de mitigación ante cambios am-

bientales. Sin embargo, estimar y cartografiar con precisión la cantidad de carbono almacenado en distintos tipos de cobertura vegetal a escala regional sigue siendo un desafío, y el estudio de los patrones espaciales no ha sido suficientemente profundizado (Wang et al., 2024). El enfoque por ecorregiones (Burkart et al., 1999) permite el análisis a escala regional a partir de la delimitación de unidades territoriales homogéneas y representativas del funcionamiento de los ecosistemas.

La creciente disponibilidad de geoinformación y el desarrollo de plataformas de procesamiento de datos han facilitado la obtención de estimaciones más precisas sobre el carbono almacenado en la biomasa forestal. Bases de datos confiables, como ESA CCI Biomass (Santoro y Cartus, 2024) y MapBiomass (2024), han proporcionado cartografía detallada sobre la biomasa en áreas globales y regionales, lo que ha permitido avances en el monitoreo y análisis de los ecosistemas. Además, productos como la cartografía de bosques de Hansen et al. (2013) y los trabajos de Ordenamiento Territorial de Bosques Nativos (OTBN) ofrecen valiosa información geoespacial sobre la distribución y el estado de los bosques, que se complementa con la cartografía de cultivos y otros tipos de cobertura de suelo. Desde el punto de vista metodológico, el uso de geotecnologías y geoinformación ha revolucionado el análisis de la biomasa y el carbono almacenado en los ecosistemas. Herramientas de procesamiento de datos en la nube, como Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017), han facilitado el acceso a grandes volúmenes de datos geoespaciales y la realización de análisis complejos a escala global y regional. Estas herramientas permiten realizar cálculos y generar mapas de manera eficiente, aprovechando su capacidad para procesar y analizar grandes cantidades de datos satelitales. Sin embargo, estas plataformas presentan limitaciones en términos de resolución espacial,pectral y radiométrica, lo que puede afectar la precisión de las estimaciones, especialmente en escalas más locales. Además, pueden presentarse errores en las capas de cobertura vegetal y discrepancias entre los valores estimados y los datos de campo, lo que subraya la necesidad de adaptar las metodologías a las características particulares de cada región para obtener resultados más confiables y ajustados a la realidad local (Chuvieco Salinero, 2008).

La integración de estos datos globales con información de campo obtenida a escala en terreno es esencial para mejorar la precisión de las estimaciones y hacerlas más aplicables a las condiciones específicas de cada región. En este sentido, las Bases de Datos Geográficas generadas por los equipos de profesionales del Centro Regional de Geomática (CeReGeo), como se registra en Aceñolaza et al. (2009), Zamboni et al. (2017) y Piani (2024),

entre otros, contribuyen a la validación y mejora de la utilidad de los productos derivados de datos satelitales, al proporcionar información local actualizada y contextualizada.

Siguiendo lo afirmado por Gaitán et al. (2025), para el modelado del Carbono Orgánico del Suelo, las principales variables predictoras se refieren a las climáticas, las topográficas, las edáficas y las de la vegetación, sumado al uso y cobertura del suelo. Estas fueron las principales variables tenidas en cuenta en este trabajo para generar la cartografía temática a escala de la provincia de Entre Ríos.

En este contexto, herramientas como el ChatGPT, Google collab y otras que utilizan inteligencia artificial son cada vez más útiles para la revisión y adaptación de algoritmos utilizados en la aplicación de geotecnologías. Estos modelos de lenguaje natural, han demostrado ser capaces de asistir en tareas relacionadas con la alfabetización espacial, teoría de SIG y la interpretación de código, lo que facilita el trabajo de usuarios no especializados en el análisis geoespacial. Sin embargo, también existen desafíos, especialmente en tareas complejas de mapeo y razonamiento espacial avanzado (Zhang et al., 2023; Hochmair et al., 2024). Las técnicas de análisis propias de las ciencias de datos permiten asimismo trabajar con grandes volúmenes de datos, pudiendo generarse bases de datos más complejas, largas y detalladas; mejorando los análisis en el dominio del tiempo y del espacio para la comprensión de los patrones espacio-temporales de los principales procesos ecológicos de los ecosistemas (Zamboni, 2017).

Así, este trabajo busca profundizar en la comprensión de los patrones espaciales del almacenamiento de carbono en ecosistemas de Entre Ríos, analizando cómo estos patrones se asocian con variables tales como las ecorregiones y la cobertura de suelo. Esta información es clave para el desarrollo de estrategias de conservación y manejo sostenible de la tierra (MST), que reconozcan y promuevan el rol de los bosques como sumideros de carbono, contribuyendo a los esfuerzos globales de mitigación del cambio climático (Ledesma et al., 2021).

El objetivo del trabajo fue cartografiar y analizar los patrones espaciales asociados al almacenamiento del carbono en la biomasa aérea en coberturas vegetales de la provincia de Entre Ríos, utilizando técnicas de procesamiento de datos en la nube.

Materiales y métodos

1. Área de estudio.

El área de estudio corresponde a la provincia de Entre Ríos, Argentina (Figura 1).

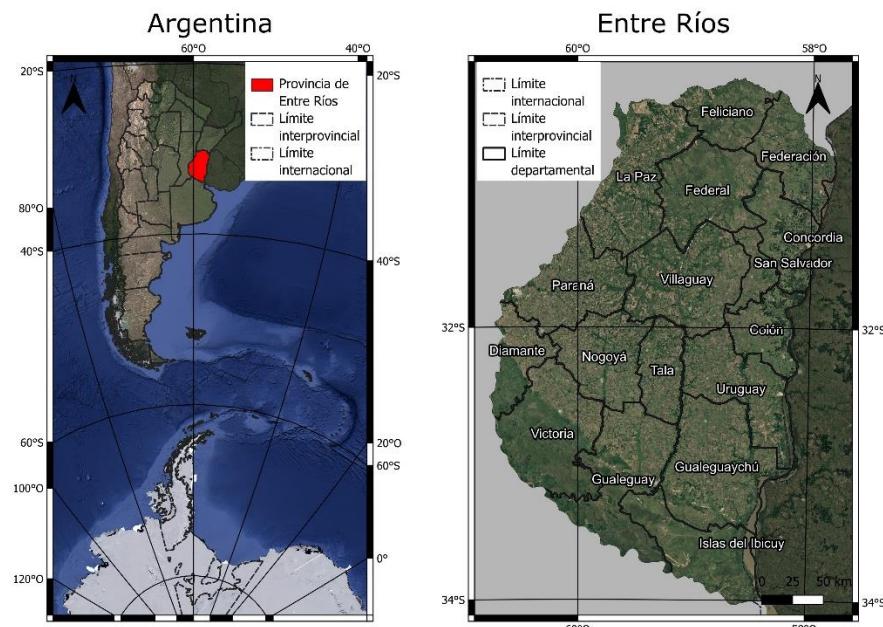


Figura 1. Área de estudio. Fuente: Elaboración propia. Límites político administrativos - Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina. Imágenes de Google Satellite © Google.

La provincia de Entre Ríos, ubicada en la región mesopotámica de Argentina, presenta un clima predominantemente templado húmedo, con precipitaciones que oscilan entre 900 y 1400 mm, temperaturas entre los 17°C y 19°C en promedio, con amplitud térmica moderada debido a la influencia de la humedad y la presencia de masas de aire provenientes del Atlántico (Bianchi y Cravero, 2010).

Los suelos pertenecen principalmente a los órdenes Molisoles, Vertisoles, Entisoles y Alfisoles (Figura 2), variando en cuanto a su fertilidad, drenaje y aptitud agropecuaria y por lo tanto a su productividad. Los Molisoles son los suelos más productivos de la provincia y predominan en la región centro-sur, especialmente en la Pampa Ondulada y parte de la Pampa Mesopotámica. El uso intensivo de estos suelos, específicamente los argiudoles, ha generado problemas de erosión y pérdida de materia orgánica, lo que pone en riesgo su productividad a largo plazo (INTA, 1990; Soriano et al., 1991). Los Vertisoles se encuentran principalmente en la región occidental de la provincia. Su alto contenido de arcilla, provoca su expansión con la humedad y contracción en períodos secos, formando grietas profundas que dificultan el laboreo agrícola, por lo que su principal uso es la ganadería extensiva. Los Entisoles son suelos jóvenes o denominados sustratos, por su escaso desarrollo. Predominan en el Delta e Islas del Paraná y están compuestos por arena, limo y arcilla, transportados por los ríos Paraná y Uruguay (INTA, 1990). Los Alfisoles se encuentran en la región noreste y en áreas de transición entre el Espinal y la Pampa Mesopotámica. Son

suelos bien estructurados, con un horizonte B de acumulación de arcilla y una fertilidad moderada siendo adecuados para la producción agrícola y ganadera (Soriano et al., 1991).

Mapa de órdenes de suelo para la provincia de Entre Ríos

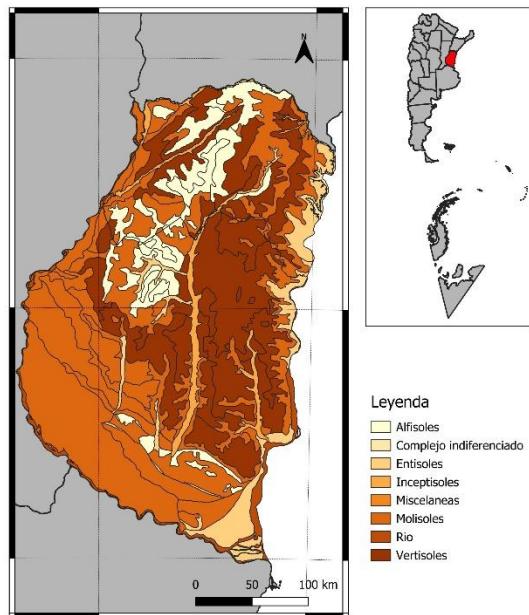


Figura 2. Mapa de suelos de Entre Ríos. Adaptado de INTA (1990).

Tomando la descripción anterior como referencia, en este trabajo se adopta el término “Ecorregión” (Burkart et al., 1999) (Figura 3). En la provincia de Entre Ríos se identifican las ecorregiones del Espinal, Delta e Islas del Paraná, Pampa Mesopotámica y, en una proporción menor, los Esteros del Iberá (SINIA, 2025). La ecorregión del Espinal ocupa gran parte del centro y oeste de la provincia. La vegetación está dominada por bosques xerófilos con especies como el algarrobo (*Neltuma nigra*, *Neltuma alba*) y el ñandubay (*Neltuma affinis*), además de pastizales abiertos con gramíneas como el paja brava (*Panicum prionitis*). La ecorregión del Delta e Islas del Paraná se extiende desde el noreste hasta el sur de la provincia, abarcando el sistema de humedales, ríos y lagunas del Delta del Paraná. La vegetación incluye bosques ribereños compuestos por sauce criollo (*Salix humboldtiana*) y aliso de río (*Tessaria integrifolia*), pajonales (*Cortaderia selloana*) y totora (*Typha spp.*), así como palmares dominados por el pindó (*Syagrus romanzoffiana*). La ecorregión de la Pampa se encuentra en el centro-sur de Entre Ríos y forma parte de la llanura pampeana, tomando regionalmente el nombre de pampa mesopotámica (Piani, 2024). Su vegetación original estaba dominada por pastizales con especies de la familia Poaceae, como el pasto miel (*Paspalum dilatatum*) y el flechilla (*Stipa spp.*), aunque en la actualidad gran parte de

la ecorregión ha sido modificada para la agricultura y la ganadería.

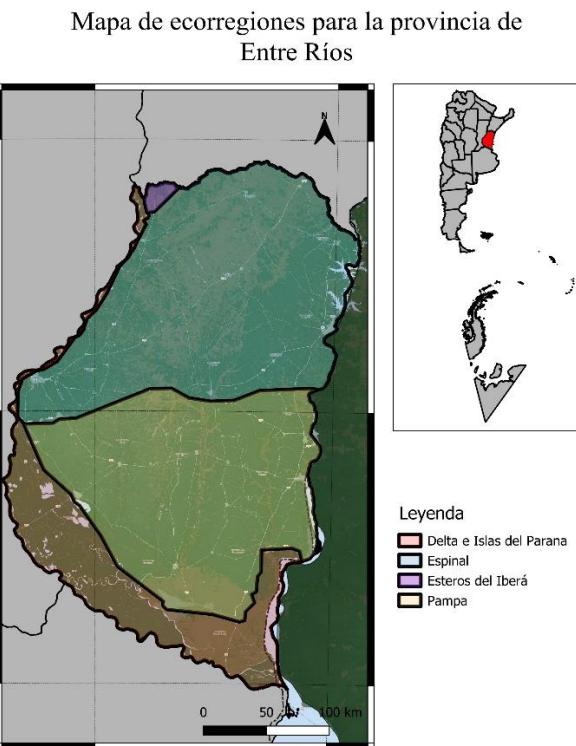


Figura 3. Mapa de ecorregiones de Entre Ríos. Adaptado de Burkart et al. (1999). Se observan las cuatro ecorregiones presentes en el territorio provincial: Espinal, Pampa, Delta e Islas del Río Paraná, y Esteros del Iberá.

2. Revisión bibliográfica

Se realizó una revisión de bibliografía centrada en las contribuciones relevantes para el área y tema de estudio, con énfasis en estimaciones de carbono y de biomasa aérea total. Además, se construyó una base de datos con información sobre carbono y biomasa, obtenida tanto de datos de terreno como de fuentes secundarias para el área de estudio. Entre las principales contribuciones científicas y técnicas utilizadas de referencia se encuentran los estudios realizados por Sione et al. (2018; 2021; 2023; 2025), Ledesma et al. (2021), las contribuciones de los profesionales del CeReGeo: Aceñolaza et al. (2007); Zamboni (2017); Eclesia et al. (2020), Piani (2024) y Evequoz González Garmendia (2025), entre otros, los cuales proporcionan datos de estimación de biomasa aérea y carbono almacenado para diferentes ecosistemas del área de estudio (Tabla 1). Se registraron en la base de datos las referencias de cada trabajo revisado, información clave (autores, año de toma de registros o año de publicación), y los valores promedio, máximos y mínimos de biomasa aérea y carbono almacenado, fracción de C considerada para la estimación de carbono y comportamiento de biomasa.

3. Base de Datos de Terreno

Se revisaron, sistematizaron, analizaron y actualizaron las bases de datos de terreno del equipo de trabajo del CeReGeo. Entre ellos, se incluyeron datos de tesis doctorales (Zamboni, 2017; Piani, 2024), y de un informe técnico con resultados de relevamientos realizados en el marco de la participación del equipo del CeReGeo en el proyecto FONTAGRO (15416 FTG/RF-15461-RG), cuyos resultados principales en este tema fueron ya publicados (Eclesia et al., 2020). Se utilizaron en total 254 datos correspondientes a registros de campo empleados como validación (201 parcelas de bosques y 53 parcelas de forestaciones). Estos conjuntos de datos permitieron contrastar las estimaciones derivadas de la capa global de biomasa ESA CCI Biomass.

Cabe mencionar que todos los datos de terreno fueron obtenidos siguiendo la misma metodología de muestreo de la vegetación recomendada por FAO (1998), que comprende la delimitación de unidades homogéneas de vegetación, la demarcación de parcelas de aproximadamente 400m² la medición de parámetros estructurales de la vegetación y la estimación de la biomasa individual empleando la ecuación de estimación de Biomasa aérea (kg) = AB [m²] * H [m] * Cf * D [kg/m³]; donde: AB = área basal (m²); H = altura (m), Cf= coeficiente de forma adaptado a cada especie; D = densidad de madera (kg/m³). El cálculo de la biomasa aérea individual se realizó extrapolando los valores por la cantidad de plantas por ha; por lo que estos datos son comparables entre sí.

4. Geoinformación para la estimación del Carbono almacenado en Biomasa Aérea Total

La capa de biomasa aérea (AGB) utilizada proviene del producto de la Agencia Espacial Europea (ESA), denominado Biomass Climate Change Initiative (Biomass_cci) v5 (Santoro y Cartus, 2024), que ofrece estimaciones globales anuales de la biomasa arbórea aérea expresados en toneladas de materia seca por hectárea (MgMS/ha). Estas estimaciones se derivan de datos de observación de la Tierra, incluyendo datos de misiones como Copernicus Sentinel-1, Envisat ASAR y los satélites ALOS-1 y ALOS-2 de JAXA. El producto tiene una resolución espacial de 100 metros por píxel, lo que permite un análisis detallado de la biomasa arbórea a nivel regional.

Se descargaron las capas raster del mencionado producto en formato GeoTiff (.tif) para el área de estudio para los años 2010, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020 y 2021. Posteriormente, las capas raster se reproyectaron, se generó un mosaico y se recortaron a la extensión de la provincia de Entre Ríos. Una vez obtenidos e integrados al proyecto SIG

los datos de biomasa de Biomass_cci, se estimó el contenido de carbono almacenado en la biomasa aérea empleando la ecuación universal de estimación del contenido de carbono a partir de datos de biomasa ($C = B * 0,5$); donde B= biomasa aérea, asumiendo que el mismo equivale aproximadamente al 50% de la materia seca sin hacer diferenciación entre especies (Brown y Lugo, 1982; IPCC 1997; Bravo et al., 2007; Sione et al., 2025).

Tomando la extensión y resolución espacial de esta capa como referencia, se definió una cuadrícula para toda la provincia de Entre Ríos con celdas de aproximadamente 90m x 90m. Esta definición se realizó contemplando que la capa de referencia es la que presenta una resolución espacial conveniente para integrar el resto de los datos, al mismo tiempo, es la más relevante en cuanto al contenido de los datos para los objetivos. Cada celda de la cuadrícula fue identificada mediante un ID único, lo que posibilitó un seguimiento preciso de la variabilidad temporal de la biomasa aérea para los años seleccionados. A partir de capas temáticas auxiliares, se estableció la correspondencia de cada celda con unidades territoriales más amplias, asignándole la categoría de Departamento, Cuenca y Ecorregión a cada celda.

Al finalizar el proceso, se obtuvo una capa con una cuadrícula conteniendo aproximadamente 9 millones de celdas, que integró además los atributos de cada una de las capas temáticas. Por lo tanto, se trabajó con un alto volumen de datos requiriendo el uso de técnicas de análisis, equipamiento y herramientas de procesamiento en la nube propias de la ciencia de datos.

5. Geoinformación para la cartografía de Cobertura y Uso del Suelo

Se incorporaron en un proyecto SIG de QGIS las capas de cobertura de suelo de MapBiomas Argentina (Proyecto MapBiomas, 2024), de distribución libre y gratuita, y capas auxiliares (límites provinciales e internacionales, capas de cultivos, cursos de agua, ejidos urbanos, Áreas Naturales Protegidas, y otros geoservicios) extraídos de la Infraestructura de Datos Espaciales de la República Argentina (IDERA, 2025) y otros repositorios de datos geográficos como el de la Dir. Hidráulica de Entre Ríos (DGHyOS, 2025) y la Infraestructura de Datos Espaciales de la FCyT - UADER (IDE-FCyT, 2025).

MapBiomas ofrece mapas anuales de cobertura y uso del suelo con una resolución espacial de 30 metros por píxel generados a partir del procesamiento de imágenes satelitales Landsat en la plataforma Google Earth Engine. La Colección 1, publicada en mayo de 2024, abarca el período 1998-2022 e incluye 15 clases de cobertura y uso del suelo. Se des-

cargaron las capas raster en formato GeoTiff (.tif) para los años 2010, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020 y 2021. Posteriormente, las capas se reproyectaron y se recortaron a la extensión de la provincia de Entre Ríos.

En el área de estudio se registraron las siguientes clases de Cobertura y Uso de Suelo (Proyecto MapBiomas, 2024):

- Bosque y arbustales cerrados: corresponde a vegetación natural leñosa con dosel continuo de arbóreas o arbustivas, con copas que se tocan o ligeramente separadas, con cobertura mayor o igual al 65%.
- Bosque abierto: corresponde a vegetación natural leñosa de arbóreas o arbustivas, con copas discontinuas, con una cobertura mayor al 20% y menor al 65%.
- Bosque inundado: corresponde a áreas de transición entre los sistemas terrestres y acuáticos puros, donde la capa freática se encuentra por lo general en la superficie o cercana a ella (áreas encharcadas). La cobertura vegetal natural formada por árboles, arbustos o una mezcla de ambos está influenciada significativamente por el agua y/o depende de inundaciones.
- Pantano y pastizal inundable: corresponde a vegetación natural herbácea predominantemente nativa influenciada por excesos de agua. Ocupa suelos hidromórficos, que se inundan en forma permanente o temporaria. Incluye bañados, esteros y orillas de lagunas y otros cuerpos de agua con vegetación típicamente higrófila, con herbáceas acuáticas y palustres, que ocupan planicies y depresiones que permanecen inundadas por breves (meses) o extensos períodos (años).
- Pastizal: corresponde a vegetación natural herbácea, o naturalizada. En general presenta una mezcla de gramíneas y dicotiledóneas herbáceas, o subarbustivas y ocasionalmente leñosas con cobertura inferior al 20 %. Ocupa suelos profundos o someros, hasta muy llanos y rocosos, bien drenados (psamófilo), mal drenados (húmedo, con notable presencia de ciperáceas), y o bajo influencia salina (halófilo). Se suele utilizar con fines ganaderos.
- Pastura: corresponde a las vegetaciones herbáceas cultivadas con una o más especies forrajeras perennes, en general de gramíneas y leguminosas exóticas. Requiere de intervención humana para permanecer como tal en el tiempo.
- Agricultura: corresponde a las áreas ocupadas con cultivos anuales, o sea que hayan sido plantadas o cosechadas durante el año de referencia. Incluye las áreas de cultivos extensivos, verdeos anuales y de horticultura. Se incluyen también áreas con pe-

ríodo de descanso entre siembras agrícolas.

- Plantación forestal: corresponde al uso de áreas con cultivos de plantas leñosas, por lo general de especies exóticas.
- Área sin vegetación: áreas con cobertura vegetal menor al 5 %. Clase mixta que incluye playas, dunas y salinas (cordones arenosos de color blanco brillante, en donde no hay predominio de vegetación de ningún tipo), infraestructura urbana y rural (con predominio de superficies no vegetadas como construcciones y asfalto, excluyendo situaciones de vegetación en asentamientos como arbolado o pastos), áreas de minería (como canteras, minería a cielo abierto, sin presencia de agua), afloramientos rocosos (roca naturalmente expuesta en la superficie sin cobertura vegetal) y otras áreas con escasa o nula cobertura vegetal.
- Río o lago: áreas con presencia de agua en superficie de forma permanente. Incluye arroyos, ríos, lagunas, lagos naturales y artificiales, y el océano.

Se realizó un análisis detallado de la composición de coberturas de suelo dentro de cada celda, calculando tanto el área absoluta como el porcentaje de superficie que ocupa cada categoría anteriormente mencionada en el área de estudio.

6. Geotecnologías y Geoestadística

Se trabajó con el software de libre y gratuita distribución QGIS versión 3.34.15 y se utilizó la proyección POSGAR 2007 Faja 5, que es la más adecuada para la provincia de Entre Ríos. En la región el uso de la Faja 5 no genera deformaciones mayores a medio metro por kilómetro, lo que la hace recomendable para escalas de 1:5.000 o mayores (Maldonado et al., 2012).

Para evaluar la precisión de las estimaciones, se aplicaron pruebas estadísticas, incluyendo la de Shapiro-Wilk modificada para evaluar la normalidad de los datos, la prueba t para dos muestras pareadas para comparar las medias, y la prueba de Wilcoxon (prueba W) para muestras pareadas cuando los datos no presentaron una distribución normal. Debido al gran volumen de datos, se utilizó la plataforma de Google Collaboratory, y las librerías pandas, geopandas, matplotlib, scipy.stats entre otras.

Resultados y discusión

La revisión bibliográfica realizada permitió identificar los principales resultados obtenidos por otros autores para la provincia de Entre Ríos. En la Tabla 1 se resumen los va-

lores de biomasa aérea y carbono reportados para las principales ecorregiones y tipos de cobertura. En el Espinal, los estudios de Sione et al. (2018, 2021, 2023), Ledesma et al. (2021) y Eclesia et al. (2020) registran biomasas aéreas que, según el tipo de bosque, estructura y manejo ganadero, oscilan aproximadamente entre valores inferiores a 40 Mg MS/ha en bosques abiertos o degradados y más de 100 Mg MS/ha en bosques cerrados o de mayor desarrollo estructural. Los valores de carbono almacenado en la biomasa aérea se ubican en el rango de 20 a 50 Mg C/ha, utilizando fracciones de carbono de 0,47 (Sione et al. 2021) y 0,50 (IPCC, 1997) de la biomasa seca para la estimación de carbono en biomasa aérea. Estudios recientes en bosques de Nandubay del Espinal en la cuenca del arroyo Feliciano (Sione et al., 2025) reportan valores de carbono en la biomasa aérea total entre 11,0 y 44,7 Mg C/ha (promedio 27,8 Mg C/ha) y alrededor de 74,7 Mg C/ha en el carbono orgánico del suelo, destacando tanto la alta variabilidad entre tipos de bosque como la utilidad de la relación aproximada $B \approx C/2$ y su vínculo con el carbono del suelo.

En la Pampa Mesopotámica, Piani (2024) documentó para forestaciones de *Eucalyptus grandis* valores de biomasa aérea comprendidos aproximadamente entre 107 y 346 Mg MS/ha, dependiendo de la edad, el tipo de suelo y el manejo forestal, lo que sitúa a estas plantaciones entre las coberturas de mayor potencial de almacenamiento de carbono de la provincia.

En el Delta e Islas del Paraná, los trabajos de Aceñolaza et al. (2007) y Zamboni (2017) registran valores de biomasa aérea total del orden de 100 Mg MS/ha en bosques mixtos de albardones internos, alrededor de 157 Mg MS/ha en bosques simples de alisales y hasta 225 Mg MS/ha en sauzales maduros, con rangos que pueden descender a valores cercanos a 7 Mg MS/ha en bosques simples abiertos. Para la misma ecorregión, Piani (2024) reportó para forestaciones de salicáceas (principalmente *Salix* spp. y *Populus* spp.) biomassas entre aproximadamente 70 y 470 Mg MS/ha, según la combinación de edad, manejo y condiciones ambientales.

En Argentina, diversos estudios han cuantificado la biomasa aérea en bosques nativos de distintas ecorregiones. Gasparri y Manghi (2004) reportaron aproximadamente 98 Mg MS/ha en el Parque Chaqueño, 173 Mg MS/ha en la Selva Tucumano-Boliviana, 266 Mg MS/ha en la Selva Misionera y 540 Mg MS/ha en el Bosque Andino Patagónico, evidenciando un gradiente amplio en la acumulación de biomasa y carbono entre ambientes húmedos de alta productividad y bosques montanos de elevada estructura.

Tabla 1. Publicaciones relacionadas con la provincia de Entre Ríos para estimaciones de Biomasa aérea total y Carbono, para diferentes compartimentos, especies/comunidades, y tipos de cobertura.

Referencia	Año	Cobertura	Especies o comunidad vegetal	Compartimento de carbono	Biomasa (MgMS/ha)	Carbono almacenado (MgC/ha)	Fracción de C
Aceñolaza et al. 2009	2002	Bosque cerrado	<i>Salix humboldtiana</i>	Hojarasca	6.8	3.4	0.5
	2002	Bosque cerrado	<i>Tessaria integrifolia</i>	Hojarasca	6.5	3.2	0.5
	2002	Bosque cerrado	<i>Albizia inundata</i>	Hojarasca	3.3	1.6	0.5
	2002	Bosque cerrado	<i>Nectandra angustifolia</i>	Hojarasca	9.6	4.8	0.5
Aceñolaza et al. 2007	2007	Bosque cerrado	<i>Salix humboldtiana</i>	Biomasa aérea	225	112.5	0.5
	2007	Bosque cerrado	<i>Tessaria integrifolia</i>	Biomasa aérea	157	78.5	0.5
	2007	Bosque cerrado	<i>Albizia inundata</i>	Biomasa aérea	100	50	0.5
	2007	Bosque cerrado	<i>Salix humboldtiana</i>	Carbono orgánico de suelo	-	53.3	-
	2007	Bosque cerrado	<i>Tessaria integrifolia</i>	Carbono orgánico de suelo	-	48.5	-
	2007	Bosque cerrado	<i>Albizia inundata</i>	Carbono orgánico de suelo	-	140	-
Ledesma et al. 2021	2021	Bosque cerrado	<i>Neltuma affinis; Vachellia caven; Neltuma nigra</i>	Biomasa aérea	111.82	52.78	0.47-0.5
	2021	Bosque cerrado	<i>Neltuma affinis; Vachellia caven; Neltuma nigra</i>	Biomasa aérea	78.05	36.84	0.47-0.5
	2021	Bosque cerrado	<i>Neltuma affinis; Vachellia caven; Neltuma nigra</i>	Biomasa aérea	102.98	48.61	0.47-0.5
	2021	Bosque cerrado	<i>Neltuma affinis; Vachellia caven; Neltuma nigra</i>	Biomasa aérea	52.13	26.02	0.47-0.5
	2021	Bosque cerrado	<i>Neltuma affinis; Neltuma nigra</i>	Biomasa aérea	102.81	48.53	0.47-0.5
	2021	Bosque cerrado	<i>Neltuma affinis</i>	Biomasa aérea	108.26	51.1	0.47
Sione et al. 2018	2018	Bosque cerrado	<i>Neltuma affinis; Vachellia caven; Neltuma nigra</i>	Biomasa aérea	80.27	40.14	0.47-0.5
Sione et al. 2021	2019	Bosque cerrado	<i>Neltuma affinis; Vachellia caven</i>	Biomasa aérea	96.03	45.29	0.47
	2019	Bosque cerrado	<i>Neltuma affinis; Vachellia caven</i>	Biomasa aérea	88.26	41.88	0.47
	2019	Bosque abierto	<i>Neltuma affinis</i>	Biomasa aérea	26.46	12.47	0.47
Sione et al. 2023	2023	Bosque cerrado	<i>Neltuma affinis; Vachellia caven; Neltuma nigra</i>	Biomasa aérea	65.5	30.8	0.47
	2023	Bosque cerrado	<i>Neltuma affinis; Vachellia caven; Neltuma nigra</i>	Carbono orgánico de suelo	-	80.5	-
Sione et al. 2025	2025	Bosque cerrado	<i>Neltuma affinis; Vachellia caven; Neltuma nigra</i>	Biomasa aérea	57.5	27.8	0.47
	2025	Bosque cerrado	<i>Neltuma affinis; Vachellia caven; Neltuma nigra</i>	Carbono orgánico de suelo	-	74.7	-
Gaitán et al. 2025	2025	Tierras Forestales Nativas	Sin descripción	Carbono Orgánico de suelo	-	66.3	-

- Cartografía de Biomasa Aérea

Se obtuvo un mapa de distribución de la biomasa aérea en la provincia de Entre Ríos a partir del producto Biomass_cci y las capas auxiliares con información territorial (Figura 4). En cuanto al patrón espacial de distribución de la biomasa aérea, se aprecian los mayores valores en las zonas asociadas a cauces de ríos, arroyos y lagunas; y principalmente al río Paraná, desde el oeste hasta el sur de la provincia, y al río Uruguay en su extensión norte-sur al este de la provincia. Los valores más altos (> 100 Mg MS/ha) se encuentran en la porción sureste de la provincia, sobre la costa del río Uruguay, representando una superficie menor al 2% del área estudiada. En otras palabras, menos del 2% de la superficie provincial presenta valores de biomasa que superan los 100 Mg MS/ha.

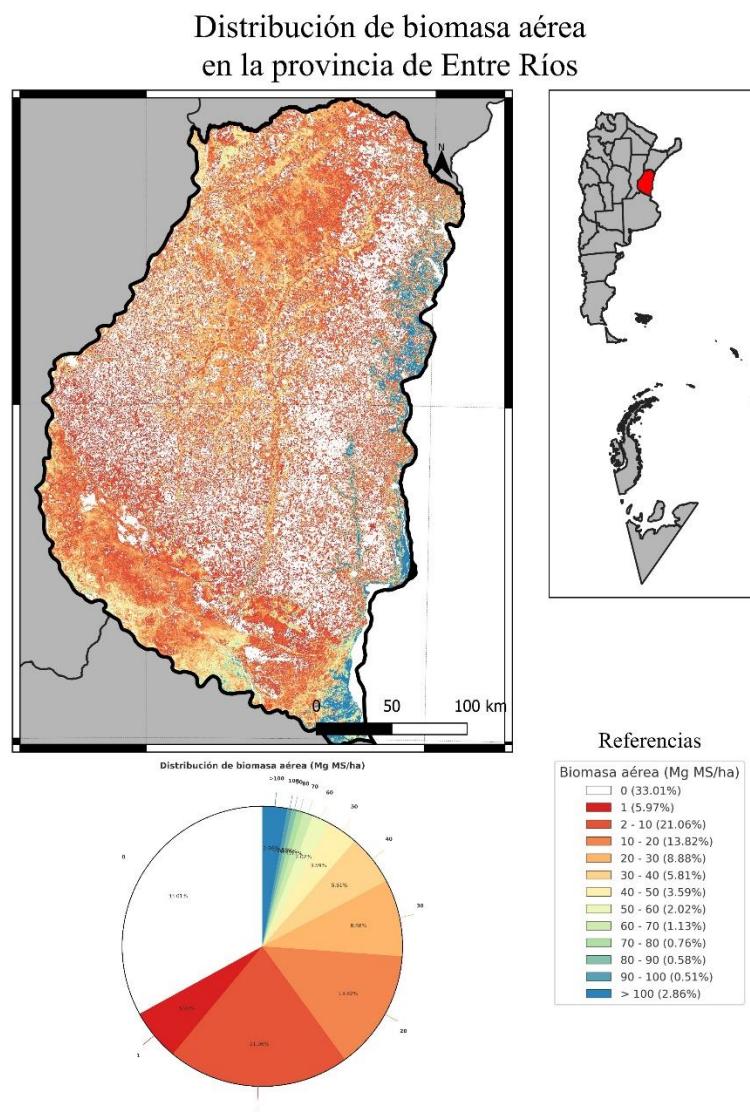


Figura 4. Mapa de distribución de biomasa aérea en la provincia de Entre Ríos generado a partir del producto ESA Biomass-CCI para el año 2021.

En términos generales el 38 % de la provincia presenta valores igual o menores a 10 Mg MS/ha, principalmente en el centro y centro-norte de la provincia; y el 57% no supera los 40 Mg MS/ha; en correspondencia con valores reportados previamente para la región (Aceñolaza et al., 2007; Aceñolaza et al., 2009; Sione et al., 2018, Ledesma et al., 2021; Sione et al., 2021; Sione et al., 2025) y la variabilidad asociada principalmente a la topografía y edafología, la vegetación y otras variables identificadas como predictoras como el clima (Gaitán et al., 2025).

Cabe mencionar que un 21,18% del territorio provincial presentó valores inferiores a 1 Mg MS/Ha; correspondiendo a zonas sin vegetación (cuerpos y cursos de agua, suelo sin cobertura vegetal, zonas urbanas, etc).

- *Carbono Almacenado en la Biomasa Aérea Total de la Provincia de Entre Ríos*

En cuanto al análisis de los patrones espaciales de distribución del carbono almacenado en la biomasa aérea total: al considerar las ecorregiones como unidades territoriales de análisis (Figura 5), en el Espinal los resultados obtenidos (8,4 Mg C/ha) coinciden parcialmente con los valores reportados por Sione et al. (2023) para bosques subxerofíticos (promedio de 31 Mg C/ha), pero revelan un promedio provincial sustancialmente menor, posiblemente asociado a la alta variabilidad reportada para algunas zonas del norte de la provincia (Sione et al., 2025). Esta discrepancia puede explicarse porque el área de estudio integra no solo los bosques analizados por Sione y colaboradores, sino también las áreas degradadas y de uso agropecuario que predominan en esta ecorregión (Eclesia et al., 2020; Ledesma et al., 2021).

En la ecorregión del Delta e Islas del Paraná, los valores obtenidos de carbono almacenado en la biomasa aérea (12,9 Mg C/ha) se ubican en el rango intermedio de lo documentado en la literatura existente. Estos resultados son consistentes con los rangos de 4 a 57 Mg C/ha que fueron reportados por Zamboni (2017) para bosques de albardones, pero resultan inferiores a los 50 Mg C/ha encontrados por Aceñolaza et al. (2007) en sauzales maduros.

En la ecorregión de la Pampa, que representa el 38% de la superficie de la provincia de Entre Ríos, se registró el 27% del carbono total de la provincia, con un promedio de 5,8 Mg C/ha.

Finalmente, la ecorregión de Esteros del Iberá, si bien posee una pequeña superficie en la provincia, contribuye con un 1% del carbono, con un promedio de 9 Mg C/ha.

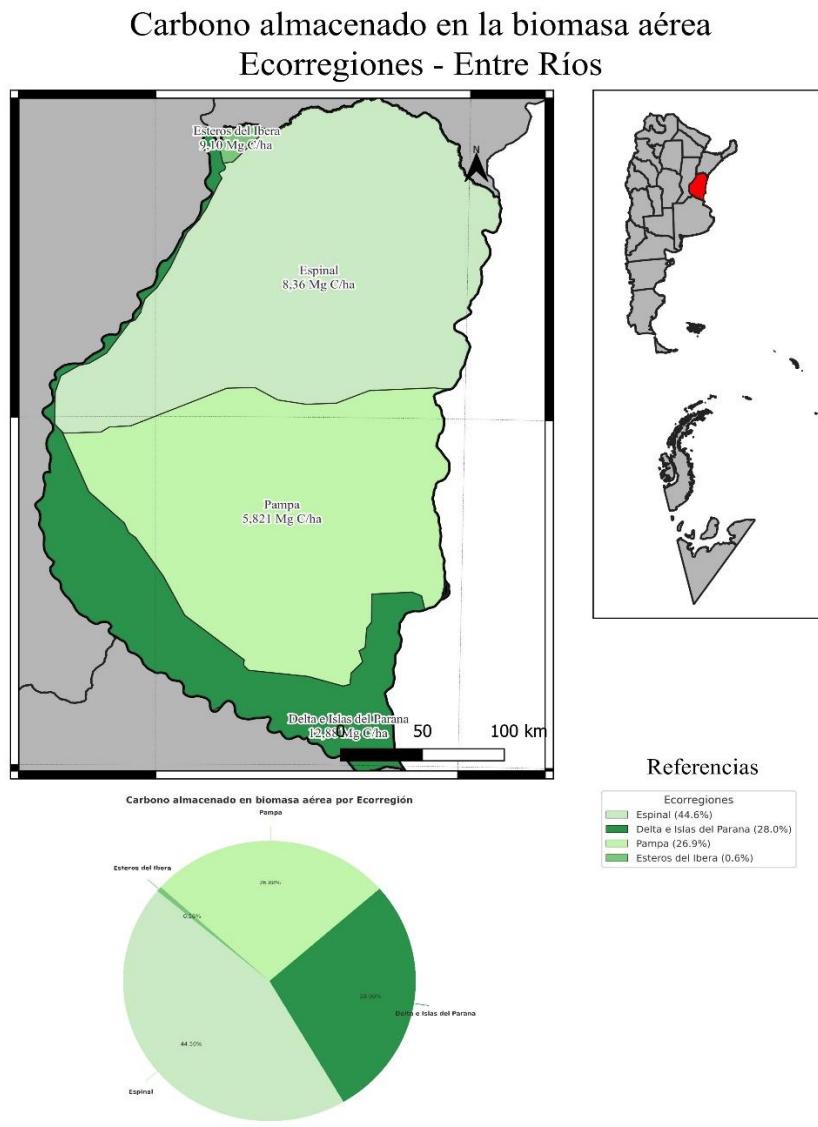


Figura 5. Distribución del Carbono almacenado en la biomasa aérea a nivel de ecorregión.

En cuanto a la distribución del Carbono tomando en cuenta las cuencas hidrográficas de la Provincia (Figura 6), la cuenca del Delta del Paraná es la que más carbono almacena, con un 26 % del total, y un promedio de 9,9 Mg C/ha, cubriendo el 21,5% de la superficie del territorio provincial. En otras palabras, el 26% del carbono se encuentra en el 21,5% de la provincia. Los Arroyos menores de Entre Ríos afluentes del Río Uruguay también tienen una contribución significativa, con el 23,3% del carbono y un promedio de 15,8 Mg C/ha, aunque sólo representan el 12 % de la superficie. En la cuenca del Río Gualeguay se almacena el 17,4% del carbono, con un promedio de 5,1 Mg C/ha, y cubre el 28 % de la superficie. Otras cuencas, como la del Río Feliciano y la Propia del Río Uruguay en Argentina, tienen contribuciones menores, con 9,2% y 6,7% del carbono total, respectivamente.

Carbono almacenado en la biomasa aérea Cuenca hidrográfica - Entre Ríos

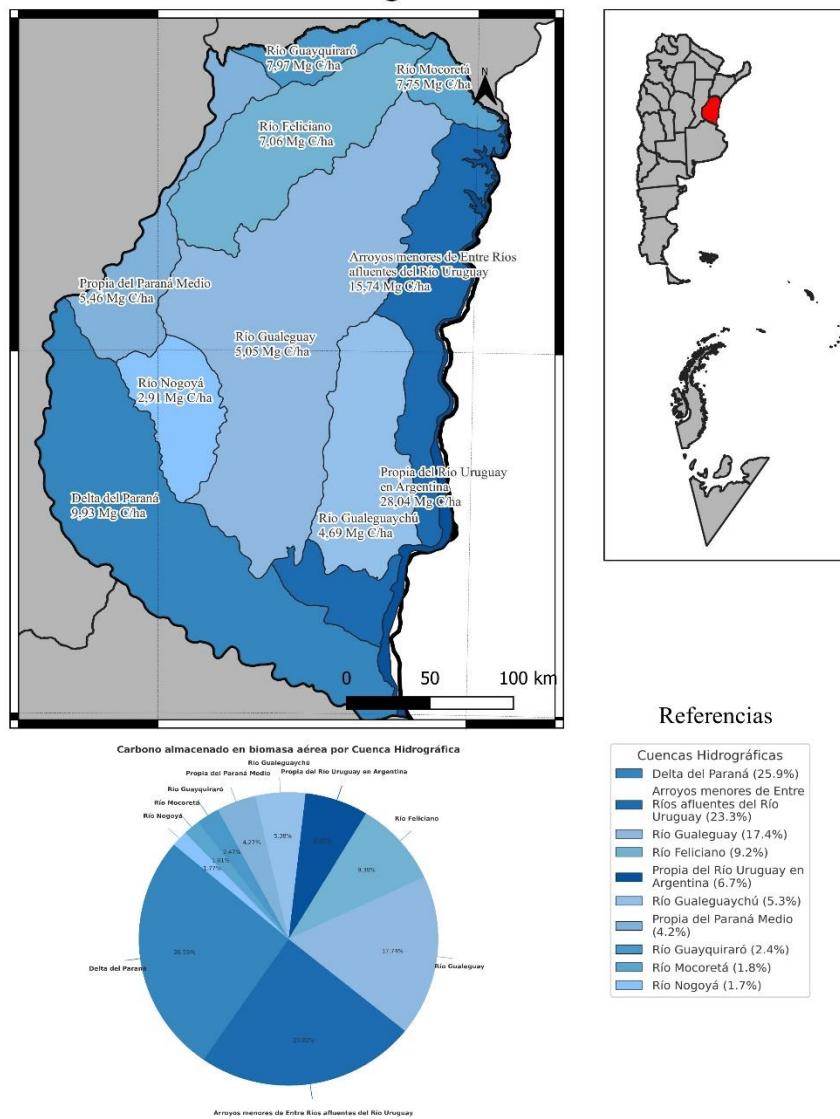


Figura 6. Carbono almacenado en la biomasa aérea a nivel de cuencas hidrográficas.

Finalmente, a nivel departamental (Figura 7), Islas del Ibicuy es el que más carbono almacena, con un promedio de 17,6 Mg C/ha, cubriendo el 6 % de la superficie. Concordia, contiene el 11,3% del carbono de la Provincia y un promedio de 22,1 Mg C/ha, representando el 4 % de la superficie. La Paz y Uruguay también tienen contribuciones importantes, con 8,4% y 7,8% del carbono total, respectivamente. En contraste, departamentos como San Salvador y Diamante tienen contribuciones menores, con 1,0% y 1,8% del carbono total, respectivamente. Los valores más elevados en los departamentos Concordia e Islas del Ibicuy pueden vincularse a la presencia de plantaciones forestales en estos departamentos.

Artículos

Evequoz González Garmendia, A. et al., Geoinformática y cartografía del carbono en la biomasa aérea...

Carbono almacenado en la biomasa aérea Departamentos - Entre Ríos

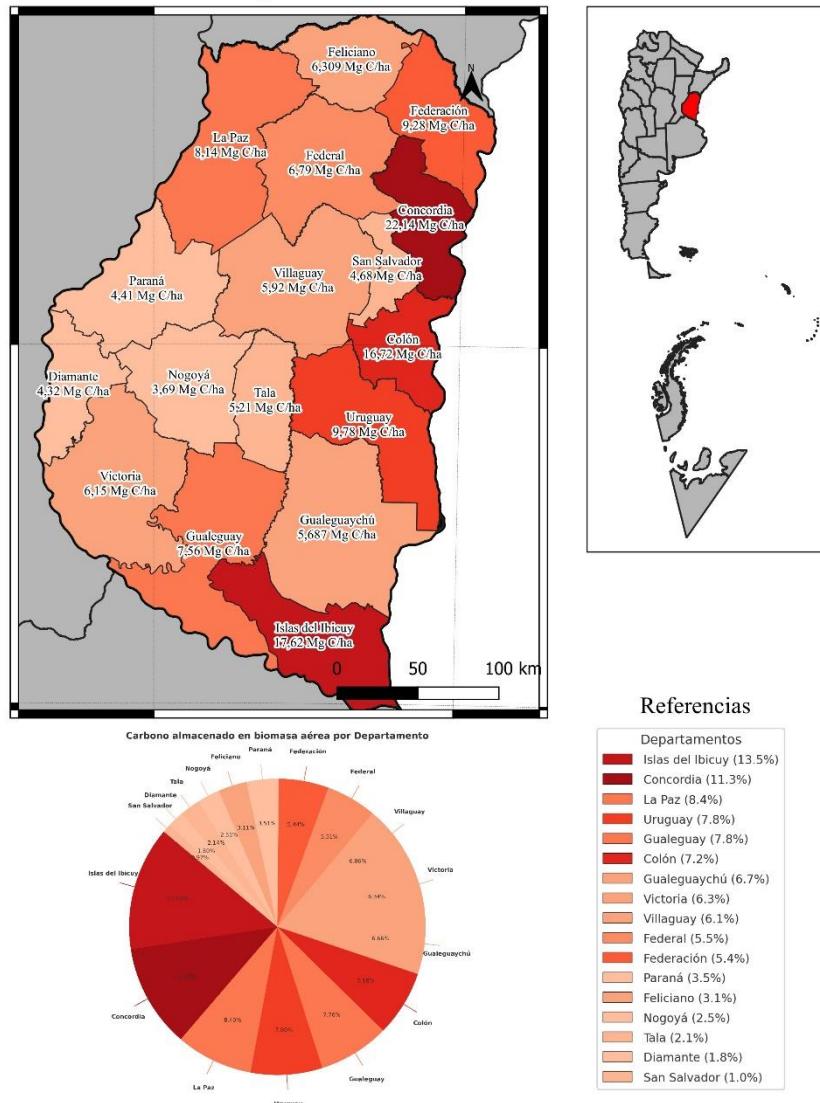


Figura 7. Carbono almacenado en la biomasa aérea a nivel de departamentos.

Los patrones espaciales muestran que las áreas con mayor almacenamiento de carbono tienden a estar asociadas con ecorregiones como el Espinal y el Delta e Islas del Paraná, así como con cuencas como la Delta del Paraná y los Arroyos menores de Entre Ríos. Estas áreas tienen un mayor almacenamiento de carbono por hectárea, asociado a su vegetación más densa.

Los patrones de almacenamiento de carbono en la provincia de Entre Ríos revelan marcadas diferencias entre los distintos tipos de cobertura vegetal (Figura 8). Los humeda-

Referencias

Departamento	Porcentaje
Isla del Ibicuy	13.5%
Concordia	11.3%
La Paz	8.4%
Uruguay	7.8%
Gualeguaychú	7.8%
Colón	7.2%
Gualeguaychú	6.7%
Victoria	6.3%
Villaguay	6.1%
Federal	5.5%
Federación	5.4%
Paraná	3.5%
Feliciano	3.1%
Nogoyá	2.5%
Tala	2.1%
Diamante	1.8%
San Salvador	1.0%

les (pantanos y pastizales inundables) presentan valores intermedios de almacenamiento (8,4 Mg C/ha), pero su amplia representación (20% del territorio) los convierte en los mayores contribuyentes al almacenamiento de carbono en la provincia (28%). Estos valores son consistentes con los reportados por Zamboni (2017) para humedales deltaicos (7-105 Mg MS/ha), aunque en el extremo inferior del rango. El bosque inundado, aunque con un alto almacenamiento de carbono (6,31 Mg C/ha), tiene un bajo impacto a escala regional (0,18% del carbono almacenado total) por su mínima extensión (0,07% del área de la provincia).

Los bosques muestran una clara gradación según su estructura: mientras los bosques abiertos (5,51 Mg C/ha) cubren cerca del 20% del área y aportan el 26% del carbono, los bosques cerrados alcanzan los valores más altos por unidad de superficie (10,98 Mg C/ha), aunque su limitada extensión (5%) reduce su contribución relativa (18%). Esta diferencia entre los bosques abiertos y los bosques cerrados coincide con los hallazgos de Sione et al. (2021) para el Espinal, donde bosques más densos almacenaban hasta 45 Mg C/ha frente a 12 Mg C/ha en formaciones abiertas.

Las plantaciones forestales registran los mayores valores de almacenamiento de carbono (29,33 Mg C/ha), superando a los bosques nativos, lo que coindice con los datos de Piani (2024) para forestaciones de salicáceas en la porción inferior del rango (35-235 MgC/ha). Su limitada distribución (1,71% de la superficie provincial) limita su impacto total (13,01% del carbono almacenado total), evidenciando que su potencial como sumideros depende críticamente de políticas de expansión sostenible.

En el extremo opuesto, los sistemas agrícolas muestran un marcado bajo aporte como reservorio de carbono (0,67 Mg C/ha), con una contribución marginal (3,39% del carbono almacenado total) pese a ocupar el 24,31% de la superficie del territorio. Los pastizales presentan valores de 1,52 Mg C/ha, que se sitúan apenas por encima del extremo inferior documentado por Eclesia et al. (2020) para sitios abiertos de tipo sabana o mixtos. Este patrón es también evidente en pasturas (0,86 Mg C/ha), cuyos valores son hasta 10 veces menores que los de pastizales naturales, coincidiendo con los reportes de Eclesia et al. (2020) sobre la pérdida de capacidad de secuestro en sistemas ganaderos intensivos.

Las áreas con cobertura vegetal menor al 5% (1,38 Mg C/ha) y los cuerpos de agua (0,49 Mg C/ha) cumplen un rol irrelevante en el almacenamiento de carbono. Estos valores que pueden parecer evidentemente demasiado altos para sectores donde no cabría esperar vegetación arbórea puede verse explicado por la asociación de estos mismos a coberturas

de mayor cobertura vegetal como parques urbanos o bosque en galería, de manera que interfiere con valores anómalos debido a la resolución espacial de los productos de biomasa aérea y cobertura de suelo.

Carbono almacenado en la biomasa aérea Cobertura y uso de suelo - Entre Ríos

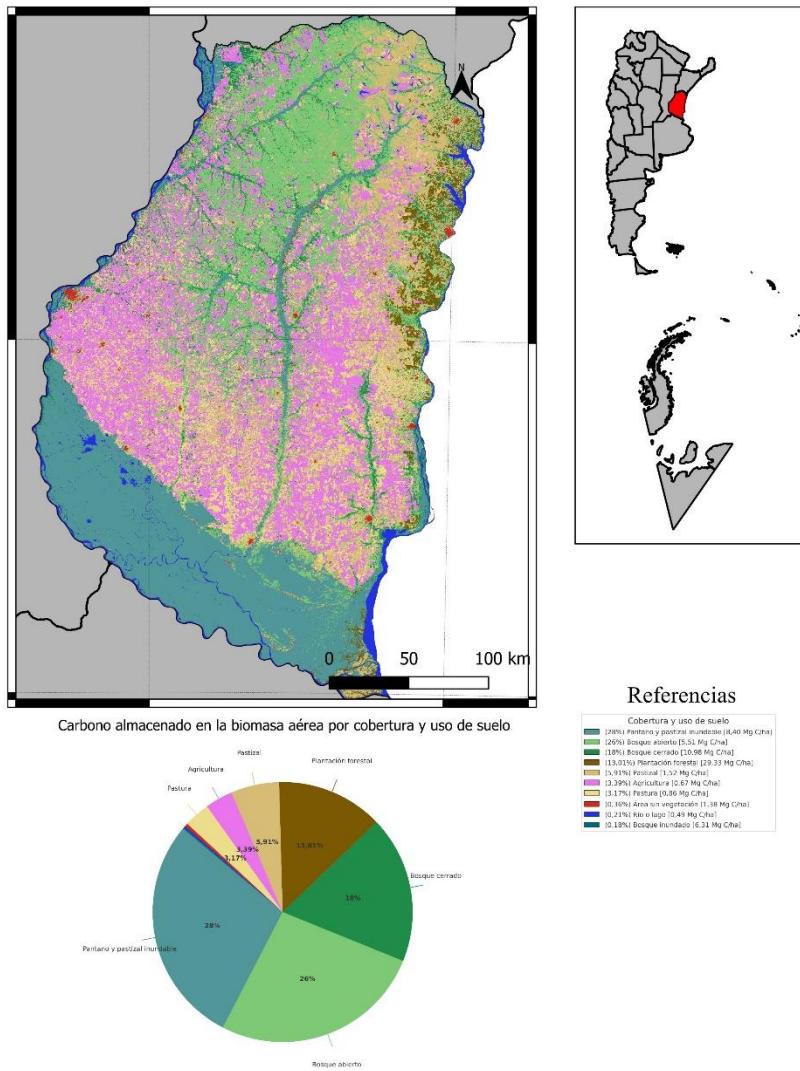


Figura 8. Mapa de cobertura y uso de suelo para la provincia de Entre Ríos a partir del producto Proyecto MapBiomas - Colección 1 para el año 2021.

En cuanto a los patrones temporales, se presenta únicamente el mapa para el año 2021, si bien se generó la cartografía para los años disponibles (2010, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020 y 2021). El resto de los mapas se encuentran disponibles en la IDE -FCyT para su descarga. No se identificaron patrones temporales consistentes de variación de biomasa entre los diferentes años del período analizado, si bien se observaron aumentos en el carbono almacenado en la biomasa aérea en la mayoría de las unidades territoriales emplea-

das, especialmente en zonas con cobertura forestal densa. Tomando como unidades las cuencas hidrográficas, la del Río Uruguay en Argentina presentó valores promedio de 26,49 Mg C/ha en 2010 y de 28,36 Mg C/ha en 2021, mientras que el Río Nogoyá registró valores de 2,40 Mg C/ha en 2010 y de 3,43 Mg C/ha en 2015.

Las ecorregiones como el Delta e Islas del Paraná superaron los 12 Mg C/ha en la mayoría de los años, mientras que la Pampa presentó valores más altos en 2010 y 2015. En el Espinal, el carbono almacenado promedio no presentó variaciones en este período.

- *Validación*

Los resultados de los análisis geoestadísticos para los conjuntos de datos utilizados a partir de puntos de validación se muestran en la tabla 2.

Tabla 2: Resultados de análisis estadístico para los conjuntos de datos utilizados.

Cobertura / Año	n	Diferencia Media	Desviación Estándar de la diferencia	Shapiro-Wilk (p-valor)	t-test Pareado (p-valor)	Wilcoxon (p-valor)
Bosque 2017	186	18,85	52,93	<0,001	<0,001	<0,001
Bosque 2018		18,47	52,60	<0,001	<0,001	<0,001
Bosque 2019		18,83	52,72	<0,001	<0,001	<0,001
Plantación forestal 2020	53	94,99	93,31	0,074	<0,001	<0,001
Plantación forestal 2021		101,58	91,87	0,018	<0,001	<0,001
Bosque 2010	15	28,77	27,08	0,199	<0,001	<0,001
Bosque 2015		32,77	26,63	0,223	<0,001	<0,001

Se realizó la validación empleando como verdad de terreno los datos de registros obtenidos de relevamientos en campo, para los diferentes conjuntos de datos disponibles. El conjunto de datos usados para la validación integró registros correspondientes a bosques con un variado grado de cobertura arbórea para los años 2017, 2018 y 2019. Los resultados de las pruebas estadísticas (Shapiro Wilks) reportaron valores de $p = <0,05$ en todos los

casos, sugiriendo que los datos no siguen una distribución normal. En consecuencia, se empleó la prueba de Wilcoxon para comparar las medias, obteniendo valores de $p=<0,05$, lo que indica diferencias estadísticamente significativas entre las estimaciones de biomasa en los valores observados y los valores observados (producto Biomass_cci) para los diferentes años analizados. La diferencia media en 2017 fue de 18,85 MgMS/ha con un desvío estándar de 52,94 MgMS/ha, en 2018 fue de 18,48 MgMS/ha con un desvío estándar de 52,60 MgMS/ha, y en 2019 fue de 18,83 MgMS/ha con un desvío estándar de 52,73 MgMS/ha.

El segundo conjunto de datos, correspondiente a plantaciones forestales para el año 2021, las pruebas indicaron diferencias significativas entre las estimaciones y los valores observados (producto Biomass_cci) ($p=<0,05$). Este conjunto de datos presentó los valores de biomasa más altos, entre 73 Mg MS/ha y 470 Mg MS/ha, y la mayor media de diferencia respecto a los valores de biomasa estimados.

El tercer conjunto de datos, correspondientes a bosques (años 2014 / 2015) en el Delta del Paraná, presentaron distribución normal, por lo que se aplicó la prueba t para muestras pareadas para comparar las medias de las estimaciones con los valores observados.

Dado que las pruebas de comparación de medias revelaron diferencias significativas en todos los casos, se concluye que las estimaciones de biomasa (Producto Biomass_cci) presentan una desviación considerable respecto a los valores observados, lo que sugiere la necesidad de ajustes en los métodos de estimación utilizados.

Tomando en cuenta los valores de referencia para otras regiones de nuestro país, como el Parque Chaqueño, la Selva Misionera, la Selva Tucumano-Boliviana y el Bosque Andino Patagónico, Gasparri y Manghi (2004) registraron valores de biomasa aérea cercanos a los 99 Mg MS/ha (Parque Chaqueño) para zonas representadas por baja proporción de coberturas arbóreas; datos mayores a los registrados en este trabajo para coberturas similares (bosques abiertos, con baja densidad de plantas, maduros). Asimismo, los registros para zonas con alta cobertura arbórea y desarrollo de los bosques como en la Selva Misionera los valores reportados alcanzaron los 266 Mg MS/ha; valores similares a los reportados en este trabajo para zonas de bosques cerrados y densos. En general los rangos de los valores registrados coinciden con los reportados para los diferentes ecosistemas estudiados de la provincia.

Los reportes analizados para los bosques nativos del Espinal en la provincia de Entre Ríos con una variación entre los 11 y 47 Mg MS/ha en promedio (Sione et al., 2018; 2025; Ledesma et al., 2021) son representativos de los registros proporcionados por los productos

globales; lo que indica la alta utilidad de estos productos principalmente a escala regional.

La variabilidad de los valores observados refleja la heterogeneidad de los distintos ecosistemas, por lo que el análisis de los patrones de distribución de la biomasa y el carbono y su relación con unidades territoriales delimitadas con criterios funcionales (ecorregiones, cuencas, cobertura y uso del suelo, etc.) y su asociación a unidades de gestión territorial (Departamentos), resulta de gran utilidad y conveniencia para generar información imprescindible para el ordenamiento territorial.

Entre los resultados registrados por MapBiomass, se identificaron zonas clasificadas como plantación forestal que, en realidad, corresponden a áreas con vegetación leñosa, posiblemente con una alta presencia de especies exóticas y un elevado valor de biomasa. Esta condición les otorga una fenología similar a las forestaciones, lo que podría explicar la clasificación errónea. Este hallazgo pone en evidencia la dificultad de discriminar entre vegetación espontánea y cultivada, lo que resalta la necesidad de intensificar el análisis en estos sitios y de contar con un conocimiento del terreno para una correcta interpretación del territorio.

Un caso concreto se observó en la Reserva de la Escuela Alberdi, donde, a pesar de que no existe plantación forestal, MapBiomass registró 1,5 hectáreas bajo esta categoría, cuando en realidad corresponden a bosque cerrado (Galarza y Quinodoz, 2012).

La información georreferenciada y datos de este trabajo se encuentran disponibles en la IDE- FCyT (<https://ide-fcyt.github.io/IDE-FCyT/>).

Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo aportan insumos para cartografiar el almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de la provincia de Entre Ríos utilizando bases de datos globales y regionales, modelos y ecuaciones, siendo esencial ajustar estos modelos a las condiciones locales del área de estudio. Esto incluye considerar la heterogeneidad de los ecosistemas, el uso de los suelos, las variables climáticas y la composición de las comunidades vegetales presentes en el ecosistema para obtener estimaciones más precisas y representativas. Los valores de biomasa reportados para diversos ecosistemas de Argentina, como el Parque Chaqueño, la Selva Misionera y el Bosque Andino Patagónico, constituyen referencias útiles. Sin embargo, los registros específicos de los ecosistemas del Espinal, la Pampa y el Delta del Paraná resultan particularmente relevantes, especialmente cuando corresponden a antecedentes de la provincia de Entre Ríos. Estos datos son funda-

mentales para comparar y contrastar los resultados de este trabajo con las estimaciones de biomasa o carbono almacenado reportadas por otros autores, permitiendo así evaluar la coherencia de los valores estimados a partir de productos globales.

Los resultados de este trabajo muestran que las áreas con mayor almacenamiento de carbono están asociadas a las ecorregiones del Espinal y el Delta e Islas del Paraná, así como a cuencas como la del Delta del Paraná y los arroyos menores de Entre Ríos.

En términos temporales, los valores de carbono y biomasa aérea muestran una estabilidad relativa a lo largo de los años, con variaciones mínimas pero sostenidas de aumento de biomasa en algunos sectores.

El análisis de la distribución de biomasa y carbono en función de unidades territoriales con criterios funcionales (ecorregiones, cuencas hidrográficas, cobertura) y su vinculación con unidades de gestión (departamentos) se presenta como una herramienta de utilidad para el ordenamiento territorial. Este enfoque permite integrar la información generada en escalas globales y regionales con las particularidades locales, lo que resulta fundamental para abordar desafíos como la conservación, la mitigación del cambio climático y la planificación del uso del suelo. En este sentido, los productos globales, aunque útiles, deben ser complementados con estudios detallados y adaptados a las condiciones específicas de cada región para maximizar su aplicabilidad y precisión. Los resultados obtenidos a partir de los valores de estimaciones globales, sin un previo ajuste a la escala local o regional, no deben ser tomados como valores absolutos sino que pueden ser utilizados de manera relativa para interpretar patrones espaciales y temporales.

Los productos globales y regionales, como MapBiomas y ESA Biomass CCI, presentan limitaciones en contextos regionales, como la dificultad para discriminar entre vegetación espontánea y cultivada, o la subestimación de biomasa para áreas con escasa o dispersa vegetación leñosa. Estas limitaciones resaltan la necesidad de complementar los productos globales con conocimiento del terreno, además de validar los resultados con datos de campo, para superar estas limitaciones y maximizar su utilidad en la gestión territorial.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Pablo Aceñolaza y Fernando Tentor por sus aportes al trabajo. Financiamiento: Consejo Interuniversitario Nacional (Beca EVC-CIN), Proyecto Federal de Innovación (PFI-Aceñolaza), UADER-PIDAC Maldonado y FONTAGRO (15416 FTG/RF-15461-RG). Apoyo institucional: UADER-FCyT y Centro Regional de Geomática.

Bibliografía citada

- ❖ Aceñolaza, P. G.; Zamboni, L. P. y J. Gallardo Lancho, 2007. “Estimación de C del suelo en tres bosques de la llanura aluvial del Bajo Paraná (R. Argentina)” (pp. 39-53). En: Juan F. Gallardo (edt.). *La captura de Carbono en ecosistemas terrestres iberoamericanos*. S.i.F.yQ.A., Salamanca.
- ❖ Aceñolaza, P.; Zamboni, L. P. y J. Gallardo Lancho, 2009. “Litterfall production of forests at the pre-Delta area of the Paraná River (Argentina)” (pp. 135-145). *Bosque*, 30.
- ❖ Bianchi, A. R. y S. A. Cravero, 2010. *Atlas Climático Digital de la República Argentina*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).
- ❖ Bravo, F.; Delgado, J. A.; Gallardo, J. F.; Bravo-Oviedo, A.; Ruiz-Peinado, R.; Merino, A.; Montero, G.; Cámaras, A.; Navarro, R.; Ordoñez, C. y E. Canga, 2007. “Métodos para cuantificar la fijación de CO₂ en los sistemas forestales” (pp. 65-112). En Bravo F (coord.). *El papel de los bosques españoles en la mitigación del cambio climático*, Fundación Gas Natural.
- ❖ Brown, S. y A. E. Lugo, 1982. “The Storage and Production of Organic Matter in Tropical Forests and Their Role in the Global Carbon Cycle” (pp. 161-187). *Biotropica*, 14. <http://dx.doi.org/10.2307/2388024>
- ❖ Brown, S., 1997. Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: A Primer. *FAO Forestry Paper 134*, Rome: For the Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- ❖ Chuvieco Salinero, E., 2008. *Teledetección ambiental*. Grupo Planeta (GBS). 594 pp.
- ❖ Dirección General de Hidráulica y Obras Sanitarias (DGHyOS), 2025. Capas de información geográfica. Gobierno de la Provincia de Entre Ríos. Recuperado de: https://www.hidraulica.gob.ar/capas_geograficas.php
- ❖ Eclesia, R. P.; Lezana, L.; Zamboni, P. y S. B. Canavelli, 2020. “Importancia del campo natural para el almacenaje de carbono en sistemas ganaderos de cría” (pp. 32-37). *Serie Extensión / EEA Paraná (INTA)*, no. 86.
- ❖ Evequoz González Garmendia, A., 2025. Mapa de carbono almacenado en la biomasa aérea en la provincia de Entre Ríos a partir del procesamiento de datos en la nube.

Artículos

Evequoz González Garmendia, A. et al., Geoinformática y cartografía del carbono en la biomasa aérea...

- Tesis de grado en Licenciatura en Biología. Universidad Autónoma de Entre Ríos. Facultad de Ciencia y Tecnología. <https://rd.fcyt.uader.edu.ar/handle/123456789/86>
- ❖ FAO, 1998. FRA 2000. Directrices para la evaluación en los países tropicales y subtropicales. *Programa de Evaluación de los Recursos Forestales*. 45 pp.
 - ❖ Gaitán, J. J.; Peri, P. L.; Barral, M. P.; Accame, M. F.; Alaggia, F. G.; Albarracín, S.; Álvarez-Cortés, D. J.; Álvarez, C.; Bacigalupo S.; Balducci E.; Benegas, N.; Barbaro, S.; Behr, S.; Beltrán, M. J.; Benedetto, M. V.; Berhongaray G.; Buduba, C.; Caballero, E.; Carfagno, P.; Caruso, C.; Casasola, E.; Céspedes, F.; Chalco Vera, J.; Colazo, J. C.; Correa, S.; Diez, J. P.; Enrico, J. M.; Enríquez, A. S.; Fantozzi, A.; Fernández, P. D.; Fernández López, C.; Furlan, N.; García Martínez, G. G.; Giannini, A. P.; Goytía, S. Y.; Gyenge, J.; Irizar, A.; Iturrealde, R.; Kloster, N.; Kurtz, Ditmar B.; La Manna, L.; Laclau, P.; Lara, J.; Ledesma, R.; Lertora, R.; López Morillo, C. S.; López, Á.; López, D.; Lupi, A.; Madias, A.; Mansilla, N.; Martinefsky, M. J.; Mastrángelo, M.; Meglioli, P. A.; Moavro, E.; Mónaco, I.; Moretti, L.; Moyano, A.; Murray, F.; Nosetto, M.; Oliva, G.; Opazo, W.; Paredes, P.; Peralta, G.; Restovich, S.; Rey Montoya, T.; Rojas, J.; Roldán, M. F.; Salvagiotti, F.; Sánchez, M. C.; Sandoval, M.; Saracco, F. S.; Sello, M. E.; Sirimarcó, X.; Sleiman, L.; Ugarte, C.; Valiente, S.; Varela, S.; Velasco, V.; Viana, A.; Villagra, P. E.; Villarino, S.; Von Wallis, A.; Vorraber, L.; Wilson, M. G.; Wolf C., Ú. I. y Ybarra D., 2025. “Modelado y cartografía del almacenamiento de carbono en los suelos de la República Argentina”. *Ciencia del Suelo*.
 - ❖ Galarza, R. A. y G. I. Quinodoz, 2012. Relevamiento del Área Natural Protegida correspondiente a la Escuela Juan Bautista Alberdi y ubicación de ejemplares de *Prosopis* sp. mediante el empleo de sistemas de información geográfica, para su estudio y caracterización. Trabajo Final de Tesis para la obtención del Título de Licenciado en Biología. 97 pp.
 - ❖ Gasparri, I. y F. Manghi, 2004. Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono de las regiones forestales argentinas (Informe Final). Dirección de Bosques, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.
 - ❖ Gorelick, N.; Hancher, M.; Dixon, M.; Ilyushchenko, S.; Thau, D. y R. Moore, 2017. “Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone” (pp 18–27). *Remote Sensing of Environment*, 202. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

- ❖ Hansen, M. C.; Potapov, P.V.; Moore, R.; Hancher, M.; Turubanova, P. V.; Tyukavina, A.; Thau, D.; Stehman, S. V.; Goetz, S. J.; Loveland, T. R.; Kommareddy, A.; Egorov, A.; Chini, L.; Justice, C. O. y J. R. G. Townshend, 2013. “High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change” (pp. 850-853). *Science* 342 (6160). DOI: 10.1126/science.1244693
- ❖ Hochmair, H. H., Juhász, L. y T. Kemp, 2024. “Correctness Comparison of ChatGPT-4, Gemini, Claude-3, and Copilot for Spatial Tasks” (2219-2231). *Transactions in GIS*, 28(7).
- ❖ Infraestructura de Datos Espaciales FCyT (IDE-FCyT), 2025. Infraestructura de Datos Espaciales de la Facultad de Ciencia y Tecnología (IDE-FCyT). Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad Autónoma de Entre Ríos. <https://ide-fcyt.gitbook.io/IDE-FCyT/>
- ❖ Infraestructura de Datos Espaciales de la República Argentina (IDERA), 2025. Infraestructura de Datos Espaciales de la República Argentina. Instituto Geográfico Nacional. <https://www.idera.gob.ar>
- ❖ INTA, 1990. *Atlas de suelos de la República Argentina*. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca. Proyecto PNUD ARG. 85/019.
- ❖ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 1997. *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Houghton, J. T.; Meira Filho, L. G.; Lim, B.; Treanton, K.; Matamat, I.; Bonduki, Y.; Griggs, D. J.; Callender B. A. (eds), IPCC/OECD/IEA.
- ❖ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2003. *Good practice guidance for land Use, land-use change and forestry*. Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Kanagawa, pp 2.7-2.17.
- ❖ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Kanagawa, pp 1.1-1.21.
- ❖ Ledesma, S. G.; Sione, M. S.; Oszust, J. D. y L. J. Rosenberger, 2021. “Estimación del contenido y captura potencial de carbono en la biomasa arbórea de bosques nativos del Espinal (Entre Ríos, Argentina)” (pp. 331-345). *FAVE Sección Ciencias Agrarias*

Artículos

Evequoz González Garmendia, A. et al., Geoinformática y cartografía del carbono en la biomasa aérea...

20 (1). <https://doi.org/10.14409/fa.v2oii.10274>

- ❖ Legg, S., 2021. IPCC, 2021. “Climate change 2021-the physical science basis” (pp. 44-45). *Interaction*, 49(4).
- ❖ Maldonado, F. D.; Sione, W. y F. R. Tentor, 2012. “Posibilidades para la cartografía de la provincia de Entre Ríos usando la extensión de la faja Gauss-Krüger” (pp. 7-16). *Scientia Interfluvius*, 3(1-2). Recuperado de: [https://revista.uader.edu.ar/index.php/aasif/article /view/61](https://revista.uader.edu.ar/index.php/aasif/article/view/61)
- ❖ Mo, L.; Zohner, C. M.; Reich, P. B.; Liang, J.; de Miguel, S.; Nabuurs, G.-J.; Renner, S. S.; van den Hoogen, J.; Araza, A.; Herold, M.; Mirzagholi, L.; Ma, H.; Averill, C.; Phillips, O. L.; Gamarra, J. G. P.; Hordijk, I.; Routh, D.; Abegg, M.; Adou Yao, Y. C.; Alberti, G.; Almeyda Zambrano, A. M.; Alvarado, B. V.; Alvarez-Dávila, E.; Alvarez-Loayza, P.; Alves, L. F.; Amaral, I.; Ammer, C.; Antón-Fernández, C.; Araujo-Murakami, A.; Arroyo, L.; Avitabile, V.; Aymard, G. A.; Baker, T. R.; Bałazy, R.; Banki, O.; Barroso, J. G.; Bastian, M. L.; Bastin, J-F.; Birigazzi, L.; Birnbaum, P.; Bitariho, R.; Boeckx, P.; Bongers, F.; Bouriaud, O.; Brancalion, P. H. S.; Brandl, S.; Brearley, F. Q.; Brienen, R.; Broadbent, E. N.; Bruelheide, H.; Bussotti, F.; Cazzolla Gatti, R.; César, R. G.; Cesljak, G.; Chazdon, R. L.; Chen, H. Y. H.; Chisholm, C.; Cho, H.; Cienciala, E.; Clark, C.; Clark, D.; Colletta, G. D.; Coomes, D. A.; Cornejo Valverde, F.; Corral-Rivas, J. J.; Crim, P. M.; Cumming, J. R.; Dayanandan, S.; de Gasper, A. L.; Decuyper, M.; Derroire, G.; DeVries, B.; Djordjevic, I.; Dolezal, J.; Dourdain, A.; Engone Obiang, N. L.; Enquist, B. J.; Eyre, T. J.; Fandohan, A. B.; Fayle, T. M.; Feldpausch, T. R.; Ferreira, L. V.; Finér, L.; Fischer, M.; Fletcher, C.; Frizzera, L.; Gianelle, D.; Glick, H. B.; Harris, D. J.; Hector, A.; Hemp, A.; Hengeveld, G.; Hérault, B.; Herbohn, J. L.; Hillers, A.; Honorio Coronado, E. N.; Hui, C.; Ibanez, T.; Imai, N.; Jagodziński, A. M.; Jaroszewicz, B.; Johannsen, V. K.; Joly, C. A.; Jucker, T.; Jung, I.; Karminov, V.; Kartawinata, K.; Kearsley, E.; Kenfack, D.; Kennard, D. K.; Kepfer-Rojas, S.; Keppel, G.; Khan, M. L.; Killeen, T. J.; Kim, H. S.; Kitayama, K.; Köhl, M.; Korjus, H.; Kraxner, F.; Kucher, D.; Laarmann, D.; Lang, M.; Lu, H.; Lukina, N. V.; Maitner, B. S.; Malhi, Y.; Marcon, E.; Marimon, B. S.; Marimon-Junior, B. H.; Marshall, A. R.; Martin, E. H.; Meave, J. A.; Melo-Cruz, O.; Mendoza, C.; Mendoza-Polo, I.; Miscicki, S.; Merow, C.; Monteagudo Mendoza, A.; Moreno, V. S.; Mukul, S. A.; Mundhenk, P.; Nava-Miranda, M. G.; Neill, D.; Neldner, V. J.; Nevenic, R. V.; Ngugi, M. R.; Niklaus, P. A.;

Oleksyn, J.; Ontikov, P.; Ortiz-Malavasi, E.; Pan, Y.; Paquette, A.; Parada-Gutierrez, A.; Parfenova, E. I.; Park, M.; Parren, M.; Parthasarathy, N.; Peri, P. L.; Pfautsch, S.; Picard, N.; Piedade, M. T. F.; Piotto, D.; Pitman, N. C. A.; Poulsen, A. D.; Poulsen, J. R.; Pretzsch, H.; Ramirez Arevalo, F.; Restrepo-Correa, Z.; Rodeghiero, M.; Rolim, S. G.; Roopsind, A.; Rovero, F.; Rutishauser, E.; Saikia, P.; Salas-Eljatib, C.; Saner, P.; Schall, P.; Schelhaas, M-J.; Schepaschenko, D.; Scherer-Lorenzen, M.; Schmid, B.; Schöngart, J.; Searle, E. B.; Seben, V.; Serra-Diaz, J. M.; Sheil, D.; Shvidenko, A. Z.; Silva-Espejo, J. E.; Silveira, M.; Singh, J.; Sist, P.; Slik, F.; Sonké, B.; Souza, A. F.; Steřenčák, K. J.; Svenning, J-C.; Svoboda, M.; Swanepoel, B.; Targhetta, N.; Tchekabakova, N.; ter Steege, H.; Thomas, R.; Tikhonova, E.; Umunay, P. M.; Usoltsev, V. A.; Valencia, R.; Valladares, F.; van der Plas, F.; Van Do, T.; van Nuland, M. E.; Vasquez, R. M.; Verbeeck, H.; Viana, H.; Vibrans, A. C.; Vieira, S.; von Gadow, K.; Wang, H-F.; Watson, J. V.; Werner, G. D. A.; Wiser, S. K.; Wittmann, F.; Woell, H.; Wortel, V.; Zagt, R.; Zawiła-Niedźwiecki, T.; Zhang, C.; Zhao, X.; Zhou, M.; Zhu, Z-X.; Zo-Bi, I. C.; Gann, G. D.; Crowther, T. W., 2023. "Integrated global assessment of the natural forest carbon potential" (pp. 92-101). *Nature* 624(7990). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06723-z>

- ❖ Piani, V. (2024). Evaluación de ecosistemas forestales del sur mesopotámico: un enfoque funcional y multitemporal en base a geomática. Tesis Doctorado en Ciencias Aplicadas. Universidad Nacional de Luján. Argentina. 122 pp.
- ❖ Proyecto MapBiomas Argentina- Colección 1 de los Mapas Anuales de Cobertura y Uso del Suelo en Argentina, accedido en 29/11/2024 a través del enlace: <https://argentina.mapbiomas.org/herramientas/>
- ❖ Santoro, M. y O. Cartus, 2024. ESA Biomass Climate Change Initiative (Biomass_cci): Global datasets of forest above-ground biomass for the years 2010, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020 and 2021, v5. NERC EDS Centre for Environmental Data Analysis, 22 August 2024. doi:10.5285/o2e1b18071ad45a19b4d3e8adafa2817. <https://dx.doi.org/10.5285/o2e1b18071ad45a19b4d3e8adafa2817>
- ❖ SINIA, 2025. Centro de Información Ambiental. Disponible en: <https://ciamambiente.gob.ar/>
- ❖ Sione, S. M. J.; Wilson, M. G.; Andrade, H. J.; Rosenberger, L. J.; Sasal, M. C. y E. A. Gabioud, E. A., 2018. Carbono almacenado en la biomasa arbórea de los bosques na-

Artículos

Evequoz González Garmendia, A. et al., Geoinformática y cartografía del carbono en la biomasa aérea...

tivos del Espinal (Argentina). VIII Congreso sobre uso y manejo del suelo. La Coruña, España, 25 al 27 de junio de 2018. La Coruña, España.

- ❖ Sione, S. M. J., Ledesma, S. G., Rosenberger, L. J., Oszust, J. D., Carpp, I. A., Wilson, M. G., Andrade Castañeda, H. J. y M. C. Sasal, 2019. “Fracción de carbono en la biomasa de *Prosopis affinis* Spreng. en un bosque nativo del Espinal (Argentina)” (pp. 6-15). *Agronomía & Ambiente*. Revista de la Facultad de Agronomía UBA, 39(1).
- ❖ Sione, S. M. J.; Andrade, H. J.; Wilson, M. G.; Rosenberger, L. J.; Sasal, M. C.; Ledesma, S. G. y E. A. Gabioud, 2021. “Reducción de emisiones de carbono por deforestación evitada en bosques del Espinal (Entre Ríos, Argentina)” (pp. 39–51). *Colombia forestal*, 24(2). <https://doi.org/10.14483/2256201X.16166>
- ❖ Sione, S. M. J.; Wilson, M. G.; Ledesma, S. G.; Oszust, J. D.; Rosenberger, L. J.; Gabioud, E. A. y Hildt, M. (2023). Relación entre las reservas de carbono en árboles y suelos de bosques semixerofíticos del Espinal. VIII Congreso Forestal Latinoamericano y V Congreso Forestal Argentino.
- ❖ Sione, S. M.; Ledesma, S. G.; Wilson, M. G.; Rosenberger, L. J.; Oszust, J. D.; Sasal M. C. y A. M. Cattaneo Hildt, 2025. “Captura y fijación de carbono como servicio ambiental de los bosques nativos del Espinal” (pp. 1-29). *Suplemento Ciencia Docencia y Tecnología* 15(18). Disponible en: <https://pcient.uner.edu.ar/index.php/Scdyt/article/view/2200/2409>
- ❖ Soriano, A., León, R., Sala, O., Lavado, R., y V. Deregbus, 1991. “Río de la Plata Grasslands” (pp. 367-407). *Ecosystems of the World*, 8(1), Elsevier.
- ❖ Wang, Y., Li, M. y G. Jin, 2024. “Exploring the optimization of spatial patterns for carbon sequestration services based on multi-scenario land use/cover changes in the changchun-Jilin-Tumen region, China”. *Journal of Cleaner Production*, Volume 438, 140788, ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140788>
- ❖ Zamboni, L. P., 2017. Dinámica del fuego en el Complejo Litoral del Río Paraná, integrando información satelital y del terreno. Tesis Doctorado en Ciencias Biológicas. Universidad Nacional de Salta. Argentina. 98 pp.
- ❖ Zamboni, L. P.; Sione, W.; Tentor, F. y P. Aceñolaza, 2017. “Fuel model cartography for the parana river fluvio littoral complex from field and remote sensing data” (pp. 65-76). *Scientia Interfluvius* 8.

- ❖ Zhang, Y., Wei, C., Wu, S., He, Z. y W. Yu, 2023. GeoGPT: understanding and processing geospatial tasks through an autonomous GPT. *arXiv* preprint arXiv:2307.07930.

Cita: Evequoz González Garmendia, A.; Piani, V. A.; Maccarrone, M. J. y L. P. Zamboni, 2025. “Geoinformática y cartografía del carbono en la biomasa aérea para Entre Ríos” (pp. 101-131), *@rchivos de Ciencia y Tecnología* Nº 7, FCyT-UADER, Oro Verde.