

ARTÍCULO CIENTÍFICO

Estimación del almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de un bosque de transición selva de Yungas–Bosque Chaqueño Semiárido de Jujuy, Argentina

Estimation of carbon storage in the aboveground biomass of a forest transition (yungas forest-semiarid chaco forest) in Jujuy, Argentina

DOI: <https://doi.org/10.36995/j.yvyrareta.2026.002>

Recibido 27 de febrero 2024; aceptado 24 de febrero 2026

Humano Cristian Ariel¹ 

¹Universidad Nacional de Jujuy. Facultad de Ciencias Agrarias. Cátedra de Dasonomía. Jujuy, Argentina cahumano@yahoo.com

Resumen

El aumento en las concentraciones de gases de efecto invernadero representa uno de los principales desafíos ambientales actuales. En este contexto, los ecosistemas forestales cumplen un rol clave como sumideros de carbono. Este estudio se centró en un bosque de transición entre la Selva de Yungas y el Bosque Chaqueño Semiárido en la provincia de Jujuy, Argentina, con el objetivo de estimar el almacenamiento actual y potencial de carbono en la biomasa aérea, en función de las tasas de crecimiento en diámetro y volumen a nivel de árbol individual. Se estimó una biomasa aérea total actual de 140,5 Mg ha⁻¹, equivalente a 67,4 Mg C ha⁻¹ acumulado, mientras que el almacenamiento potencial anual estimado para los próximos 10 años fue de 0,5 Mg C ha⁻¹ año⁻¹. En términos de mitigación, el bosque podría absorber aproximadamente 1,6 Mg CO₂ ha⁻¹ año⁻¹, valor que resalta la importancia de su conservación frente a amenazas como la deforestación. Estos resultados brindan herramientas clave para valorar el aporte de estos ecosistemas al balance de carbono y al diseño de estrategias de manejo sustentable.

Palabras clave: Mitigación; Sumidero de carbono; Transición.

Abstract

The increase greenhouse gas concentrations represent one of today's major environmental challenges. In this context, forest ecosystems play a key role as carbon sinks. This study focused on a transitional forest between the Yungas Forest and the Semi-arid Chaco Forest in the province of Jujuy, Argentina, with the aim of estimating current and potential carbon storage in aboveground biomass, based on diameter and volume growth rates at the individual tree level. A total current aboveground biomass of 140.5 Mg ha⁻¹, was estimated, equivalent to 67.4 Mg C ha⁻¹ accumulated, while the estimated annual potential storage for the next 10 years was 0.5 Mg C ha⁻¹ year⁻¹. In terms of mitigation, the forest could absorb approximately 1.6 Mg CO₂ ha⁻¹

year⁻¹, a value that highlights the importance of its conservation in the face of threats such as deforestation. These results provide key tools for assessing the contribution of these ecosystems to carbon balance and for designing sustainable management strategies.

Keywords: Mitigation; Carbon sink; Transition.

Introducción

El cambio climático representa uno de los mayores desafíos ambientales del siglo XXI, impulsado principalmente por el aumento en las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera (Rodrigues et al., 2023). Las concentraciones de los tres principales GEI alcanzaron niveles récord para el año 2023. El incremento en la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera (CO₂) fue del 51%, mientras que el incremento del metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) representó el 165% y 24% respectivamente desde periodos preindustriales (OMM, 2024). Las emisiones de CO₂ provienen mayormente de la quema de combustibles fósiles y, en segundo lugar, de la deforestación y el cambio de uso del suelo (Tian et al., 2021). A nivel global, se estima que las emisiones asociadas al uso del suelo representan alrededor del 10 % de las emisiones antropogénicas totales (IPCC, 2022). En este contexto, se requieren acciones urgentes que permitan tanto reducir las emisiones como aumentar la captura y el almacenamiento de carbono a través de soluciones basadas en la naturaleza.

Los ecosistemas forestales cumplen una función central en el ciclo global del carbono (Haseeb et al., 2024). A través del proceso de fotosíntesis, los árboles capturan CO₂ atmosférico y lo almacenan en forma de biomasa (fuste, ramas, hojas y raíces) y materia orgánica del suelo (Urdapilleta et al., 2018). Se estima que los bosques absorben alrededor de 3.5 ± 0.4 Pg C año⁻¹, actuando como importantes sumideros de carbono (Pan et al., 2024). Sin embargo, el almacenamiento neto de carbono en los bosques depende del tipo y composición de su estructura y del tipo de manejo (Ledesma et al., 2021).

Los bosques cubren aproximadamente 4.060 millones de hectáreas a nivel mundial, lo que representa alrededor del 31% de la superficie terrestre total (FAO, 2020). Sin embargo, se estima una tasa de reducción de su superficie de 2,4% debido principalmente a cambios en el uso del suelo (Potapov et al., 2022). Cuando los bosques son deforestados o degradados, se libera una porción significativa del carbono acumulado en la biomasa y el suelo, transformándose en fuentes netas de emisiones. En consecuencia, el manejo y la conservación de los bosques juegan un papel clave en las estrategias de mitigación del cambio climático. Ciertas estrategias como la restauración, el manejo forestal sustentable y la protección contra la

deforestación contribuyen a mantener y aumentar el almacenamiento de carbono en los bosques (Griscom et al., 2017), los bosques podrían resultar sumideros netos de carbono durante los próximos 100 años (IPPC, 1995).

El almacenamiento neto de carbono orgánico en los bosques depende del manejo dado a la cobertura vegetal, edad, composición de especies, distribución de tamaños de individuos, estructura y composición de ésta (Ledesma et al., 2021).

Los bosques subtropicales desempeñan un rol crucial en la regulación del clima tanto a nivel regional como global. En Argentina, la provincia de Jujuy posee principalmente dos sistemas boscosos de importancia social, ecológica y económica, la Selva de Yungas (Cabrera, 1976) y el Bosque Chaqueño Semiárido (Morello et al., 2012). La Selva de Yungas se extiende en la ladera oriental de los Andes desde el sur de Perú y Bolivia hasta el noroeste argentino (Brown et al., 2002). El Bosque Chaqueño Semiárido se extiende desde el norte y centro de Argentina hacia el oeste de Paraguay, parte de Bolivia y una pequeña franja de Brasil (Burkat et al., 1999). Ambos sistemas representan ambientes contrastantes: las Yungas son un ecosistema húmedo de montaña, mientras que el Chaco Semiárido es un ecosistema seco de llanura. Sin embargo, en Jujuy están conectadas por gradientes ecológicos donde las especies se encuentran adaptadas a estas zonas de transiciones ambientales. En su conjunto los dos ecosistemas abarcan una superficie de 1.100.000 ha (SAyDSCh, 2005) y albergan una notable biodiversidad proporcionando múltiples servicios ecosistémicos, entre ellos la regulación del clima, la protección del suelo, la provisión de agua y la captura de carbono. No obstante, la fragmentación y degradación de estos bosques producto del avance de la frontera agrícola y el sobre aprovechamiento forestal no solo compromete la biodiversidad, sino que también reduce su capacidad de actuar como sumideros de carbono (Gasparri y Grau, 2009; Hernández et al., 2010).

La Argentina asumió reportar sus inventarios nacionales de GEI's y así contabilizar los gases emitidos y absorbidos de la atmósfera durante un período de tiempo determinado, para el periodo 2016-2017 el país emitió 314 Mt CO₂e (INGEI, 2017), la región del Parque Chaqueño representa el mayor porcentaje de las emisiones (86%), la Selva Misionera y el Espinal representan un 5% cada uno, y la Selva Tucumano Boliviana representa el 4% (SAyDS, 2019).

Frente a este escenario, resulta clave promover acciones que fortalezcan el rol de los bosques como aliados en la mitigación del cambio climático. El manejo forestal sustentable, por ejemplo, puede mantener bosques dinámicos que, de manera paulatina, logren almacenar mayores cantidades de carbono (Leyva et al., 2021). Diversos estudios destacan que los bosques maduros continúan secuestrando toneladas de CO₂ cada año (Nuñez Regueiro, 2021). En este contexto, la estimación de biomasa y carbono adquiere relevancia no solo desde una perspectiva ecológica, sino

también como herramienta clave para cuantificar el aporte de los ecosistemas forestales en la mitigación del cambio climático. Se estima que aproximadamente el 50% de la biomasa seca de los ecosistemas terrestres corresponde a carbono (IPCC, 2007), por lo que conocer el volumen de biomasa permite estimar con mayor precisión los stocks de carbono que pueden ser almacenados (Vásquez y Arellano, 2012).

Además, la creciente preocupación por el cambio climático y los compromisos globales de reducción de emisiones han impulsado el desarrollo de mecanismos de conservación basados en incentivos económicos, tales como los programas de prevención de la deforestación (Plaza et al., 2008), los cuales dependen directamente de estimaciones robustas de biomasa y carbono.

Por ello, el objetivo de este trabajo fue contribuir al ajuste de metodologías para la estimación de biomasa y contenido de carbono específicas para las especies arbóreas del Bosque transicional Selva de Yungas- Bosque Chaqueño Semiárido, mediante la estimación de las tasas de crecimiento en diámetro y volumen a nivel de árbol individual, y el cálculo del carbono acumulado actual y potencial en la biomasa forestal.

Materiales y métodos

Área de estudio

El trabajo se realizó en el Campo Experimental “Dr. Emilio Navea” (24° 21´ 8” S, 65° 11´ 28” O, 900 msnm) de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad de Jujuy que cuenta con una superficie de 110 ha. El clima es subtropical serrano con estación seca. La temperatura anual promedio es de 18 °C y el régimen de precipitaciones es monzónico con 650 mm anuales y déficit hídrico desde abril hasta noviembre (Braun Wilke, 2001).

El suelo corresponde a un Argiustol vértico con fuerte grado de desarrollo y drenaje imperfecto. Presenta un horizonte argílico B2t bien definido, con estructura marcada hasta los 50 cm de profundidad. La textura varía de arcillosa a arcillo-limosa (50–60) con concreciones ferromagnéticas y calcáreas (Nadir y Chafatinos, 1990).

El relieve está compuesto por valles abiertos dominados por un extenso abanico aluvial con pendientes entre 1 y 5%. La vegetación característica es la del Bosque transicional, dominada por elementos xerofíticos (Braun Wilke, 2001), donde las especies arbóreas predominantes son *Aspidosperma quebracho blanco*, *Libidibia paraguariensis*, *Anadenanthera colubrina*, *Parapiptadenia excelsa* y *Schinopsis lorentzii* (Cabrera, 1976, Humano et al., 2012).

Obtención de datos

En el año 2009 se estableció una parcela permanente rectangular de 3 hectáreas (100 m × 300 m), en la cual se identificaron y marcaron todos los árboles con diámetro a la altura del pecho (DAP) superior a 10 cm. A partir de los datos de inventario del área de trabajo se adecuó el tamaño de la parcela para asegurar un error de muestreo igual o inferior al 10 %, con un nivel de confianza del 95 %, según lo establecido por la Resolución N° 81/2009 de la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. La parcela fue remedida cada dos años durante un período de diez años (2009–2019).

De cada individuo se registró la especie botánica, cuya identificación se realizó en campo con apoyo de bibliografía especializada (Legname, 1982; Dimitri et al., 2000). El DAP se midió a 1,30 m del suelo utilizando cintas dendrométricas, con precisión milimétrica. La altura total (ht), definida como la distancia desde el suelo hasta el ápice y la altura de fuste (hf), distancia desde la base hasta el inicio de la copa, se midieron con clinómetro con un error de $\pm 2^\circ$ a $0,01^\circ$.

Cálculo del índice del valor de importancia de las especies y clases diamétricas

A partir de los datos relevados se calcularon los valores de abundancia, dominancia y frecuencia de cada especie, así como sus respectivas proporciones relativas. Con esta información se estimó el Índice de Valor de Importancia (IVI) para cada especie (Araujo, 2003). Luego, las especies fueron clasificadas en tres categorías de importancia ecológica siguiendo la propuesta de Lamprecht (1990): especies de alta importancia ($IVI > 15$), de importancia media ($5 < IVI \leq 15$) y de baja importancia ($IVI < 5$).

Además, los individuos fueron agrupados en clases diamétricas de 10 cm, criterio comúnmente utilizado en inventarios forestales de la región (Araujo, 2003; Grulke et al., 2007; Brassiolo y Abt, 2014) y se estimó el área basal (AB) por clase diamétrica.

Estimación del crecimiento diamétrico y la biomasa aérea total

El crecimiento individual se estimó a través del incremento periódico anual (IPA) expresado en cm año^{-1} , calculado como la diferencia entre el DAP medido en 2019 y el de 2009, dividido por los años transcurridos. Luego se agruparon los IPA por clase diamétrica para calcular el crecimiento medio por clase (Araujo, 2003).

El volumen de fuste (VF) de cada árbol se calculó a partir de las tablas de cubicación propuestas por Sévola (1975). Para especies sin ecuaciones de cubicación disponibles, se estimó multiplicando su sección transversal (m^2) por la altura del fuste y un coeficiente de forma estándar de 0,65 (RESOL. 81, 2009). La biomasa de fuste (BF, en Mg) se obtuvo multiplicando el VF (m^3) de cada individuo por la densidad básica de la madera (DB en $Mg\ m^{-3}$) específica para cada especie, tomada de la base de datos de INTI-CITEMA (2007).

Para estimar la biomasa aérea total (BAT), se aplicó un factor de expansión de biomasa (FEB) para obtener la porción correspondiente a la biomasa de la copa del árbol, ajustado por Brown y Lugo (1992). Este factor depende de la biomasa de fuste: si $BF \geq 190\ Mg\ ha^{-1}$, se aplica un FEB de 1,74; si $BF < 190\ Mg\ ha^{-1}$, se emplea una fórmula que otorga mayor peso relativo a ramas y hojas en bosques con menor BF (BROWN *et al.*, 1999):

$$FEB = (3.213 - 0.506 \cdot \ln BF)^e$$

La BAT ($Mg\ ha^{-1}$) se calcula finalmente como el producto entre BF y FEB.

Estimación de carbono almacenado actual y potencial acumulado a 10 años

El contenido de carbono en la biomasa aérea se estimó considerando que aproximadamente el 48% de la biomasa corresponde a carbono (IPCC, 2007; SAyDS, 2019). En este sentido, el carbono en biomasa ($Mg\ C\ ha^{-1}$) se obtuvo de multiplicar BAT y 0.48. Para expresar el carbono almacenado en términos de CO_2 equivalente (CO_2e), se utilizó el factor de conversión de 3,67, que representa la relación entre los pesos moleculares del CO_2 y el C (44/12) (IPCC, 2007).

El contenido potencial de C capturado y la cantidad del CO_2 retenido por una hectárea en un período de 10 años se obtuvo empleando los IPA obtenidos para cada individuo en la estimación de la BAT potencial.

Análisis de los datos

Para determinar si existían diferencias estadísticamente significativas en el stocks de biomasa del bosque estudiado entre el almacenamiento actual y potencial en 10 años, se aplicó la prueba estadística de T Student para medias apareadas considerando un $\alpha:0,05$ (nivel de significancia) y un nivel de confianza de 95%. Se empleó software INFOSTAT (2010) (DI RIENZO *et al.*, 2010).

Resultados y discusión

Caracterización ecológica y estructural del bosque

En la parcela se identificaron 813 individuos correspondientes a 27 especies de 19 familias distintas y una densidad de 271 ind. ha⁻¹ con un AB de 19,59 m² ha⁻¹ (Tabla 1).

Acorde a su importancia ecológica (Lamprecht, 1990) *A. colubrina* fue la única especie de la categoría de mayor importancia (IVI= 16,8) (Tabla 1). Cinco de las especies encontradas (*P. excelsa*, *Ruprechtia laxiflora*, *L. paraguariensis*, *Schinopsis lorentzii* y *Geoffroea decorticans*) fueron clasificadas como de importancia media (IVI= 6,8-15) mientras que el resto de las especies de baja importancia ecológica. Las especies de mayor valor forestal a excepción de *S. lorentzii* son de baja importancia ecológica (*Neltuma nigra*, *N. alba* y *A. quebracho blanco*). Más del 30 % de las especies tienen IVI's menores a 1 lo que indicaría especies con una población vulnerable, debido a su baja representatividad (abundancia y ocupación) con respecto al resto de las especies, ante disturbios antrópicos y naturales (Araujo, 2003). Al corresponder la ocupación de cada especie con su BAT, en la mayoría de los casos a mayor ocupación existe una mayor BAT, hay excepciones como en el caso de *S. lorentzii* que posee una BAT elevada con respecto a su ocupación, esta situación puede explicarse, individuos de gran altura de fuste que generan un gran volumen de madera correspondiendo a los 22,64 Mg ha⁻¹ (Hernández et al., 2010).

Tabla 1. IVI de las especies arbóreas

Table 1. IVI of tree species

| Especies | Abundancia | | Dominancia | | IVI | | BAT |
|----------------------------------|--------------------------|----------|------------------------------------|----------|----------|----------|--------------------|
| | Absoluta | Relativa | Absoluta | Relativa | Absoluta | Relativa | (Mg |
| | (Ind. ha ⁻¹) | (%) | (m ² ha ⁻¹) | (%) | | (%) | ha ⁻¹) |
| <i>Anadenanthera colubrina</i> | 50 | 18,5 | 2,9 | 15,2 | 33,6 | 16,8 | 39,3 |
| <i>Parapiptadenia excelsa</i> | 45 | 16,6 | 2,6 | 13,4 | 30,1 | 15,1 | 26,3 |
| <i>Ruprechtia laxiflora</i> | 23 | 8,4 | 2,7 | 13,9 | 22,4 | 11,2 | 4,3 |
| <i>Libidibia paraguariensis</i> | 32 | 11,8 | 1,2 | 6,4 | 18,2 | 9,1 | 7,1 |
| <i>Schinopsis lorentzii</i> | 26 | 9,5 | 1,7 | 8,6 | 18,2 | 9,1 | 22,6 |
| <i>Geoffroea decorticans</i> | 17 | 6,2 | 1,4 | 7,3 | 13,6 | 6,8 | 8,5 |
| <i>Celtis tala</i> | 11 | 4,1 | 0,5 | 3,0 | 7,1 | 3,5 | 5,9 |
| <i>Allophylus edulis</i> | 10 | 3,6 | 0,6 | 3,3 | 7,1 | 3,5 | 1,1 |
| <i>Neltuma alba</i> | 4 | 1,4 | 1,1 | 5,5 | 7,0 | 3,5 | 1,44 |
| <i>Calycophyllum multiflorum</i> | 11 | 4,1 | 0,4 | 2,3 | 6,4 | 3,2 | 3,20 |
| <i>Neltuma nigra</i> | 8 | 2,9 | 0,4 | 2,2 | 5,2 | 2,6 | 4,10 |
| <i>Senegalia praecox</i> | 2 | 0,7 | 0,9 | 4,7 | 5,4 | 2,7 | 0,1 |
| <i>Zizyphus mistol</i> | 6 | 2,2 | 0,3 | 1,5 | 3,8 | 1,9 | 1,2 |
| <i>A. quebracho-blanco</i> | 1 | 0,3 | 0,6 | 3,3 | 3,7 | 1,8 | 0,1 |
| <i>Phyllostylon excelsum</i> | 4 | 1,4 | 0,3 | 1,8 | 3,3 | 1,6 | 0,7 |
| <i>Tipuana tipu</i> | 3 | 1,1 | 0,3 | 1,6 | 2,7 | 1,4 | 7,5 |
| <i>Chloroleucon tenuiflorum</i> | 4 | 1,4 | 0,1 | 0,7 | 2,1 | 1,1 | 3,0 |
| <i>Erythroxylum argentinum</i> | 3 | 1,1 | 0,1 | 0,5 | 1,6 | 0,8 | 0,4 |
| <i>Xilosma pubescens</i> | 2 | 0,7 | 0,2 | 1,1 | 1,8 | 0,9 | 0,1 |
| <i>Acanthosyris falcata</i> | 2 | 0,7 | 0,1 | 0,3 | 1,1 | 0,5 | 2,1 |
| <i>E. contortisiliquum</i> | 1 | 0,3 | 0,1 | 0,6 | 1,1 | 0,5 | 0,1 |
| <i>Fagara naranjillo</i> | 1 | 0,3 | 0,1 | 0,5 | 0,9 | 0,4 | 0,1 |
| <i>Terminalia triflora</i> | 1 | 0,3 | 0,1 | 0,5 | 0,9 | 0,4 | 0,1 |
| <i>Bougainvillea stipitata</i> | 1 | 0,3 | 0,1 | 0,2 | 0,6 | 0,3 | 0,2 |
| <i>Carica quercifolia</i> | 1 | 0,3 | 0,1 | 0,2 | 0,6 | 0,3 | 0,1 |
| <i>Achatocarpus praecox</i> | 1 | 0,3 | 0,1 | 0,1 | 0,4 | 0,2 | 0,1 |
| <i>Sapium haemospermum</i> | 1 | 0,3 | 0,1 | 0,1 | 0,4 | 0,2 | 0,4 |

Biomasa aérea total y almacenamiento de carbono actual

La distribución de los individuos por clase diamétrica mostró una estructura típicamente inversa, con una mayor concentración en las clases menores: el 62% de los individuos se ubicó en la clase de 10–19,9 cm de DAP, disminuyendo progresivamente hacia las clases mayores (Tabla 2). Esta tendencia es característica de bosques en regeneración activa o con aprovechamiento selectivo, donde predomina la regeneración natural y los árboles jóvenes (Araujo, 2003).

En cuanto al área basal, se observó una mayor contribución de las clases intermedias (20–29,9 cm), que concentraron el 33% del área total. Si bien las clases mayores (≥ 50 cm) representaron solo el 1,5% de los individuos, aportaron el 8,7% de la biomasa de fuste, lo que resalta la importancia relativa de los árboles de gran porte en el almacenamiento de carbono.

El total de biomasa aérea estimada (BAT) fue de $140,5 \text{ Mg ha}^{-1}$, con un stock de carbono de $67,43 \text{ Mg C ha}^{-1}$ y un equivalente de CO_2 secuestrado de $247,47 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$. Más del 60% de la biomasa aérea total se concentró en las dos primeras clases diamétricas (DAP < 30 cm), lo que indica una contribución significativa de los árboles jóvenes y de porte medio al almacenamiento actual de carbono. Esto sugiere que, aunque las clases mayores son escasas, el conjunto del bosque presenta un alto potencial de captura de carbono si se mantiene su estructura y dinámica actual.

Los IPA obtenidos son en promedio de $0,5 \text{ cm año}^{-1}$ para todos los individuos (Tabla 2), son similares a los obtenidos por otros autores para un ecosistema similar (Araujo, 2003; Araujo et al., 2007; Humano et al., 2013; Brassiolo y Grulke, 2015; Kees et al., 2018).

El valor obtenido de biomasa aérea total (BAT) fue de $140,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Tabla 2), coincidente con el reportado por Urdapilleta (2018) para un bosque del Chaco Húmedo. Este valor resulta superior a los estimados por otros autores en el Bosque Chaqueño, como Gasparri y Manghi (2004), quienes reportaron $49,5 \text{ Mg ha}^{-1}$; Ontiveros et al. (2015), con $75,6 \text{ Mg ha}^{-1}$; y Manrique et al. (2009), con $104,8 \text{ Mg ha}^{-1}$. En cambio, Hernández et al. (2010) registraron un valor más alto, de $170,22 \text{ Mg ha}^{-1}$. En comparación con estimaciones realizadas en las Yungas, se observa una mayor paridad respecto a los valores reportados por Manrique et al. (2014) de $145,6 \text{ Mg ha}^{-1}$, pero inferior a los reportados por Gasparri y Manghi (2004) y Ontiveros et al. (2015), quienes estimaron $184,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ y $172,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ respectivamente. Estas diferencias podrían deberse a variaciones en la estructura del bosque y a una mayor presencia de especies de gran porte en las Yungas, aunque es importante señalar que el área de estudio comparte especies dominantes con ese ecosistema, como *A. colubrina* y *P. excelsum* (Humano et al., 2012). Por otro lado, trabajos realizados en ecosistemas más

secos como el Espinal reportan valores de biomasa más bajos o variables, con 92,6 Mg ha⁻¹ (Ledesma et al., 2021) y 156,6 Mg ha⁻¹ (Duval y Cámara Artigas, 2021). Esta variabilidad se asocia con la heterogeneidad estructural de estos sistemas, determinada por la densidad arbórea por clase diamétrica y la ocupación espacial de las especies (Ledesma et al., 2021).

El valor de Factor de expansión de biomasa (FEB) fue de 3,28 (Tabla 2) resultando similar al propuesto por Hernández et al. (2010) de 3,3; esto sugiere que las ecuaciones alométricas estimadas para un amplio rango de especies forestales, difieren poco, pudiendo ser posible aplicar modelos realizados para ciertas especies en alguna parte del mundo, para predecir la biomasa aérea de otras en otras zonas (Manrique et al., 2009).

La cantidad de carbono almacenado fue de 67,43 Mg C ha⁻¹ (tabla 2), la mayor cantidad se encuentra en las primeras clases diamétricas (10>DAP<40 cm) coincidente con la mayor densidad de individuos (ind. ha⁻¹). Este valor es menor a los propuestos para el Bosque Chaqueño por Hernández et al. (2010) de 85,2 Mg C ha⁻¹ y la SAyDS (2019) de 79,21 Mg C ha⁻¹, en tanto es mayor al reportado por Manrique et al. (2009) y Urdapilleta (2018) de 50,2 Mg C ha⁻¹ y 68,3 Mg C ha⁻¹ respectivamente, para un ecosistema con similar estructura forestal. Al comparar el valor obtenido con otros ecosistemas resulta menor al propuesto por la SAyDS (2019) de 119 Mg C ha⁻¹ para Selva de Yungas y similar al de Duval y Cámara Artigas (2021) de 78,2 Mg C ha⁻¹ para El Espinal, un ecosistema de menor diversidad y densidad arbórea.

El almacenamiento de CO₂ por parte de la biomasa forestal fue de 247,47 Mg ha⁻¹ (Tabla 2), se observa que existe una correlación positiva entre la cantidad de individuos en cada clase y el almacenamiento. El valor obtenido es similar al propuesto para el Chaco Húmedo (Urdapilleta, 2018) de 240,6 Mg ha⁻¹ y menor al propuesto de 284,5 Mg ha⁻¹ para el Espinal (Duval y Cámara Artigas, 2021), en este último el tamaño de los individuos que se registraron fue a partir de los 5 cm de DAP lo que provocó una mayor densidad (Ind. ha⁻¹).

Tabla 2. Almacenamiento actual de carbono en la biomasa aérea total, por clase diamétrica y en total. FEB: factor de expansión de biomasa, BAT. Biomasa aérea total

Table 2. Current carbon storage in total aboveground biomass, by diameter class and overall

| Clase diamétricas (cm) | Densidad (Individuos ha ⁻¹) | Área Basal (m ² ha ⁻¹) | IPA (cm año ⁻¹) | Biomasa aérea (Mg ha ⁻¹) | FEB | BAT (Mg ha ⁻¹) | Stock C (Mg C ha ⁻¹) | CO ₂ e (Mg CO ₂ ha ⁻¹) |
|------------------------|---|---|-----------------------------|--------------------------------------|------|----------------------------|----------------------------------|--|
| 10-19,9 | 168 | 5,5 | 0,47±0,53 | 12,2 | 3,28 | 40,0 | 20,0 | 73,4 |
| 20-29,9 | 72 | 6,5 | 0,45±0,37 | 13,6 | 3,28 | 44,7 | 22,4 | 82,1 |
| 30-39,9 | 20 | 3,6 | 0,48±0,56 | 8,4 | 3,28 | 27,4 | 13,7 | 50,3 |
| 40-49,9 | 7 | 2,2 | 0,92±0,05 | 4,5 | 3,28 | 14,8 | 7,4 | 27,2 |
| 50 o mayor | 4 | 1,7 | 0,37±0,22 | 4,1 | 3,28 | 13,5 | 6,8 | 24,8 |
| Total | 271 | 19,6 | 0,5 | 42,8 | 3,28 | 140,5 | 70,2 | 257,8 |

Los IPA obtenidos son en promedio de 0,5 cm año⁻¹ para todos los individuos (Tabla 3), son similares a los obtenidos por otros autores para un ecosistema similar (Araujo, 2003; Araujo et al., 2007; Humano et al., 2013; Brassiolo y Grulke, 2015; Kees et al., 2018).

Biomasa aérea total y almacenamiento de carbono potencial en 10 años

De acuerdo con las estimaciones de almacenamiento potencial a 10 años (Tabla 3), se calcula una capacidad anual de captura de carbono de aproximadamente 0,5 Mg C ha⁻¹ año⁻¹ en el ecosistema estudiado. Este valor es menor al registrado en otros sistemas forestales con distintas condiciones climáticas, como las Yungas, donde se estimaron 0,7 Mg C ha⁻¹ año⁻¹ (Duque et al., 2021) o El Espinal, con 0,6 Mg C ha⁻¹ año⁻¹ (Ledesma et al., 2021). Esta diferencia puede atribuirse a la menor tasa de crecimiento de las especies presentes en el ecosistema bajo estudio. En bosques sucesionales disturbados, Vaccaro et al. (2003) reportaron un valor aún mayor, de 0,8 Mg C ha⁻¹ año⁻¹, asociado a la elevada tasa fotosintética de los individuos jóvenes durante las primeras etapas de sucesión, lo cual se traduce en un rápido incremento de la biomasa aérea, especialmente en copas y follaje (Brown y Lugo, 1990; Duval y Cámara Artigas, 2021). A partir de estas tasas, se estima que 1 ha del bosque de transición Yungas-Chaco Semiárido puede absorber aproximadamente 1,6 Mg CO₂ ha⁻¹ año⁻¹, un valor inferior al propuesto por Ledesma et al. (2021) para El Espinal (2,7 Mg CO₂ ha⁻¹ año⁻¹). Estos valores no solo reflejan la capacidad de captura de carbono, sino también el volumen potencial de emisiones de CO₂ por deforestación. En este sentido, cabe destacar que entre 2002 y 2013, el Bosque Chaqueño perdió 322.361 ha debido a la expansión de la frontera agropecuaria (SAyDS, 2019).

Tabla 3. Acumulación potencial de biomasa aérea total

Table 3. Potential accumulation of total aerial biomass

| Clases diamétricas (cm) | IPA (cm año ⁻¹) | Biomasa aérea (Mg ha ⁻¹) | | BAT (Mg año ⁻¹) | Stock C (Mg C ha ⁻¹) | CO ₂ e (Mg CO ₂ ha ⁻¹) |
|-------------------------------|--------------------------------|--|------|-----------------------------------|--|--|
| | | | FE | | | |
| 10-19,9 | 0,56 | 14,1 | 3,28 | 43,4 | 21,7 | 79,6 |
| 20-29,9 | 0,65 | 17,1 | 3,28 | 47,4 | 23,7 | 87,0 |
| 30-39,9 | 0,70 | 9,8 | 3,28 | 28,6 | 14,3 | 52,5 |
| 40-49,9 | 0,80 | 5,8 | 3,28 | 15,3 | 7,7 | 28,1 |
| 50 o mayor | 0,95 | 5,1 | 3,28 | 14,0 | 7,0 | 25,7 |
| Total | | 51,8 | | 148,7 | 74,4 | 272,9 |

Al realizar la comparación de la acumulación actual y potencial del ecosistema se puede observar que existen diferencias significativas en el periodo de 10 años (Figura 1).

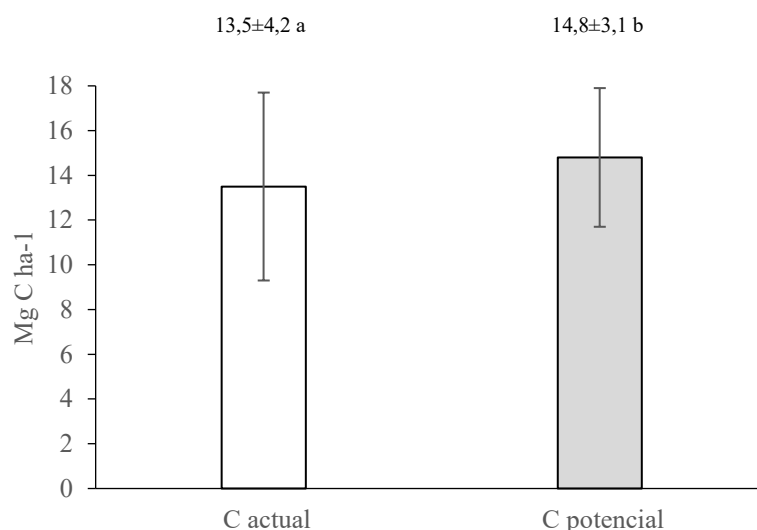


Figura 1. Comparación del stock promedio de carbono actual vs potencial. Medias: valor de media aritmética ± la desviación estándar (D.E.) p: grado de significación estadística (p < 0,05), letras distintas indica diferencias estadísticamente significativas.

Figure 1. Comparison of current vs potential average carbon stock

El crecimiento de la estructura forestal implica una mayor tasa de acumulación de carbono, este crecimiento se ve favorecido si el bosque contiene mayor proporción de individuos en las primeras clases diamétricas (Ledesma et al, 2021), según Vaccaro et al. (2003) la biomasa presenta la mayor tasa de acumulación a través de la sucesión forestal, hasta los 15-20 años, momento a partir del cual la tasa comienza a decrecer hasta la madurez; los bosques tienen una capacidad limitada de almacenamiento

(Ledesma et al., 2021), por ello el manejo forestal, a partir del aprovechamiento forestal, permitirá dinamizar el bosque (Humano, 2022) y acelerar el almacenamiento de carbono hasta lograr una nueva estabilidad. Ledesma et al. (2021) recomienda mantener poblaciones en constante recuperación de biomasa favoreciendo la captura de GEI's.

Conclusión

El almacenamiento potencial anual en los próximos 10 años fue de 0,5 Mg C ha⁻¹ año⁻¹, valor inferior a lo reportado para ecosistemas más productivos como las Yungas o El Espinal. Y que esta tasa menor tasa atribuirse a la baja velocidad de crecimiento de las especies dominantes del sitio.

Una hectárea de bosque de transición puede capturar aproximadamente 1,6 Mg CO₂ por año, lo que representa un valor significativo considerando el contexto de creciente pérdida de cobertura forestal en la región. Además, que el carbono almacenado en la biomasa aérea actual constituye una reserva estratégica, y que cuya liberación —en caso de deforestación— contribuiría a aumentar las emisiones de gases de efecto invernadero

. La información obtenida en este trabajo es relevante en pos de preservar este ecosistema el cual está en constante presión de fragmentación, en donde se emplaza el complejo tabacalero de la provincia. Es una nueva herramienta y una nueva opción para motivar a los productores tabacaleros de conservar el bosque y disminuir los desmontes

Referencias bibliográficas

- Araujo, P. A., Juárez de Galíndez, G. M. & Iturre, M. (2007). "Crecimiento de las especies principales de un bosque en regeneración del Chaco Santiagueño". *Quebracho* 14: 36-46.
- Araujo, P. A. (2003). "Bases para la gestión sostenible de Bosques en Regeneración del Chaco Semiárido". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. España. 219 p.
- Brassiolo, M. M. & Abt, M. (2014). "Silvicultura en Bosques Nativos de la Región Chaqueña Argentina". En: Giménez, A. M. y G.I. Bolzón (Eds.). Educación e Investigación Forestal para un equilibrio vital. Cooperación Binacional Argentina-Brasil. Pp.: 77-109. UNSE (Argentina) – Universidad Federal de Paraná (Brasil). Santiago del Estero, Argentina. 376 p.

- Brassiolo, M. & Grulke, M. (2015). "Manual de manejo de Bosque nativos de la Región Chaqueña. Redaf. Unique. 97 p.
- Braun Wilke, R. H. (2001). "Carta de Aptitud ambiental de la Provincia de Jujuy". Colección: Arte y Ciencia. Red de Editoriales Universitarias Nacionales. Jujuy. Argentina. 120 p.
- Brown, A. D., Grau, A., Lomáscolo, T. & Gasparri, N. I. (2002). Una estrategia de conservación para las Selvas subtropicales de montaña (Yungas) de Argentina. *Revista Ecotropicos*, 15: 147-159.
- Brown, S. & Lugo, A. E. (1992). Aboveground biomass estimates for tropical moist forests of the Brazilian Amazon. *Interciencia* 17(1): 8-27.
- Brown, S. L., Schroeder, P. & Kern, J. S. (1999). Spatial distribution of biomass in forests of the eastern USA. *Forest Ecology and Management* 123: 81-90.
- Burkart, R., Bárbaro, N. O., Sánchez, R. O., & Gómez, D. A. (1999). Eco-regiones de la Argentina. Asociación de parques Nacionales. 25 p.
- Cabrera, A. L. (1976). "Enciclopedia Argentina de agricultura y jardinería. Regiones Fitogeográficas Argentinas". Fascículo I. Editorial Acme. Bs. As, Argentina. 85 p.
- Duque, A., Peña, M., Cuesta, F., Gonzalez Caro, S., Kennedy, P., Phillips, O., Calderon Loo, M., Blundo, C., Carrilla, J., Cayola, L., Farfán Ríos, W., Fuentes, A., Grau, R., Homeler, J., Loza Rivera, M., Malhi, Y., Malizia, A., Malizia, L., Martínez Villa, J., Myers, J., Osinaga Acosta, O., Peralvo, M., Pinto, E., Saatchi, S., Silman, M., Tello, S., Terán Valdez, A. & Feeley, F. (2021). "Mature Andean forests as globally important carbon sinks and future carbon refuges". *Nature Communications*. 10 p. DOI: 10.1038/s41467-021-22459-8
- Dimitri, M. J., Leonardis, R. F. J. & Biloni, J. L. (2000). "El nuevo libro del árbol". Tomos I y II. Editorial El Ateneo. Buenos Aires, Argentina. 124 p.
- Di Rienzo, J., Balzarini, M., Gonzalez, L., Casanoves, F., Tablada, M. & Walter Robledo, C.. (2010). Infostat: software para análisis estadístico.
- Duval, S.V. & Cámara Artigas, R. (2021). Diversidad y captura de carbono en un bosque secundario de Caldén (*P. caldenia*) en La Pampa, Argentina. *Estudios Geográficos*, 82 (291).
- FAO. (2020). Global Forest Resources Assessment 2020: Main report. Rome. 16 p.
- Gasparri, N. I. & Grau, H.R. (2006). Patrones regionales de deforestación en el Subtrópico argentino y su contexto ecológico y socioeconómico. Pp. 442-446 en Brown, A.D., Martínez Ortiz, U., Acerbi, M. & Corcuera, J. (eds.) *La Situación Ambiental de la Argentina*. Fundación Vida Silvestre Argentina.
- Gasparri, I & Manghi, E. (2004). Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono de las regiones forestales argentinas. Informe Final. Unidad de Manejo

- del Sistema de Evaluación Forestal. Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable. Ministerio de Salud y Ambiente. 26 p.
- Griscom, B.W., Adams, J., Ellis, P.W., Houghton, R.A., Lomax, G., Miteva, D.A., Schlesinger, W.H., Shoch, D., Siikamäki, J.V., Smith, P., Woodbury, P., Zganjar, C., Blackman, A., Campari, J., Conant, R.T., Delgado, C., Elias, P., Gopalakrishna, T., Hamsik, M. R., Herrero, M., Kiesecker, J., Landis, E., Laestadius, L., Leavitt, S.M., Minnemeyer, S., Polasky, S., Potapov, P., Putz, F.E., Sanderman, J., Silvius, M., Wollenberg, E. & J. Fargione. (2017). Natural climate solutions. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 114: 11645–11650.
- Grulke, M., Brassiolo, M., Diaz Lanes; F., Obst K., Ortíz, G.& Soto, G.. (2007). “Manual para el manejo forestal sustentable de los bosques nativos de la Provincia del Chaco”. Ministerio de la Producción del Gobierno de la Provincia del Chaco. Argentina. 113 p.
- Haseeb, M., Tahir, Z. & Mehmood S. A. (2024). Enhancing Carbon Sequestration through Afforestation: Evaluating the Impact of Land Use and Cover Changes on Carbon Storage Dynamics. *Earth Syst Environ* 8: 1563–1582.
- Hernández, P., Rios, N., Giménez, A. M., Pintos, J. & Lopez Diaz, A. (2010). Estimación de la Biomasa Forestal en Bosques Nativos del Chaco Semiárido. Consejo Profesional de Ciencias Forestales del Chaco. 5 p.
- Humano, C; Giulianotti, C.G.; Duran, A. & Gaspar, S. (2012). Composición, Estructura y Diversidad arbórea de un rodal disetáneo característico del ecotono Yungas-Bosque Chaqueño semiárido, de la provincia en Jujuy-Argentina. *Agraria VI* (13), 84-90.
- Humano, C., Durán A., Gaspar S. & Giulianotti C. (2013). Crecimiento de especies nativas de un rodal con y sin manejo del ecotono Yungas-Chaco semiárido de Jujuy, Argentina. *Agraria. VII* (14), 56-68.
- Humano, C. A. (2022). Crecimiento del Bosque Chaqueño Semiárido de Jujuy en distintas situaciones estructurales. Tesis Doctoral. Doctorado en Ciencias Forestales. UNSE. 162 p.
- INTI-CITEMA. (2007). Listado de densidades secas de maderas. Buenos Aires (Argentina): INTI. http://www.inti.gov.ar/citema/densidad_cientifico.pdf.
- Inventario nacional de gases de efecto invernadero. (INGEI). 2017. Ministro de Ambiente y Desarrollo Sustentable. 19 p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 1995. The Potencial Impact of Climate Change on Agriculture and Forestry. Likely Impacts of Climate Change, Report from Working Group II to IPCC, OMM, PNUMA.

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate change). (2007). *Climate change: impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate change). (2022). Index. In IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.026
- Kees, S. M., Merletti, J., Gómez, C. & Brassiolo, M. (2018). "Efectos de la corta sobre un bosque alto del Chaco Húmedo". *Actas XXVIII Reunión Argentina de Ecología*. Mar del Plata. 719 p.
- Lamprecht, H. (1990). "Silvicultura en los trópicos. Los ecosistemas forestales en los bosques tropicales y sus especies arbóreas". *GTZ. Alemania*. 335 p.
- Ledesma, S. G., Sione, S. M. J., Ozsust, J. D., & L. Rosenberger. 2021. Estimación del contenido y captura potencial de carbono en la biomasa arbórea de bosques nativos del Espinal (Entre Ríos, Argentina). *Fave. Sección Ciencias Agrarias*, 20 (1): 331-345.
- Legname, P. R. (1982). "Árboles indígenas del Noroeste Argentino". *Opera Lilloana* 34. Tucumán, Argentina. 142 p.
- Leyva Pablo, T., León González, F. D., Etchevers Barra, J. D., Cortés-Pérez, M., Santiago García, W., Ponce Mendoza, A. & Fuentes-Ponce, M. H. (2021). Almacenamiento de carbono en bosques con manejo forestal comunitario. *Madera y Bosques* 27).
- Manrique, S., Franco, J., Núñez, V. & Seghezzo, L. (2009). Estimación de Densidad de Biomasa Aérea en Ecosistemas Naturales de la Provincia de Salta. *AVERMA* 13 (6), 37-45.
- Manrique, S., Franco, J. & Nuñez, V. (2014). Biomass feedstock availability for the supply of bioenergy in Lerma Valley (Salta, Argentina): an evaluation for energy territorial planning. *American Journal of Biomass and Bioenergy* (3), 34 – 57.
- Morello, J., Mateucci, S. D., Rodriguez, A. F. & Silva, M.E. (2012). *Ecorregiones y complejos Ecosistémicos de Argentina*. Orientación Gráfica Editora, Buenos Aires. 719 p.
- Nadir, A. & Chafatinos T. (1990). "Los suelos del NOA (Salta y Jujuy)". Tomo 1. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta. Salta, Argentina. 97 p.
- Núñez Regueiro, M. M. (2021). *Ecología y Conservación en la ecorregión Chaqueña*. Repositorio Conicet Digital N° 2. 5 p.
- Organización meteorológica mundial (OMM). (2024). *State of Climate Services*. 30 p.

- Ontiveros, S., Manrique S., Franco J., Díaz R. & Barranco, N. (2015). Biomasa y stock de carbono en la Reserva de Campo Alegre, la Caldera, provincia de Salta. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 19, 1-12.
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A. & Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333 (6045), 988-993.
- Plaza, G., Pasculli, M. & Pacheco, L. (2008). Gestión ambiental forestal en el marco del cambio climático en el bosque chaqueño de Salta. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 12.
- Potapov, P., Hansen, M.C., Pickens, A., Hernandez-Serna, A., Tyukavina, A., Turubanova, S., Zalles, V., Li, X., Khan, A., Stolle, F., Harris, N., Song, X.-P., Baggett, A., Kommareddy, I. & Kommareddy, A. (2022). The Global 2000-2020 Land Cover and Land Use Change Dataset Derived From the Landsat Archive: First Results. *Front. Remote Sens.* 3, 856903.
- Resolución 081 (RESOL. 81). (2009). Secretaría de Gestión Ambiental. Ministerio de Producción y Medio Ambiente. Jujuy. Argentina. 24 p.
- Rodrigues, C. I. D., Brito, L. M. & Nunes, L. J. R. (2023). Soil Carbon Sequestration in the Context of Climate Change Mitigation: A Review. *Soil Systems*, 7(3),64-85.
- Secretaria de ambiente y desarrollo sustentable (SAyDSCh). (2005). Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos. Informe Regional Parque Chaqueño. Proyecto bosques nativos y áreas protegidas. Préstamo BIRF 4085-AR. Argentina. 135 p.
- Secretaria de ambiente y desarrollo sustentable (SAyDS). 2019. Nivel de referencia de emisiones forestales de la República Argentina. 40 p.
- Sevola, Y. (1975). Cubicación de árboles en el inventario forestal del noroeste Argentino. Documento de trabajo No20. FAO:DP/ ARG/70/536. Salta, Argentina.
- Tian, S., Wang, S., Bai, X., Luo, G., Li, Q., Yang, Y., Hu,Z., Li, C. & Deng Y. (2021). Global patterns and changes of carbon emissions from land use during 1992–2015. *Environmental Science and Ecotechnology*, 7, 100108.
- Urdapilleta, A. (2018). Cuantificación del carbono almacenado en la biomasa arbórea en un predio ubicado en la región del Parque Chaqueño húmedo, Argentina. Trabajo Final de la Carrera de Ingeniería Forestal. Universidad Nacional de La Plata. 64 p.
- Vásquez, A. & Arellano, H. (2012). Estructura, biomasa aérea y carbono almacenado en los bosques del sur y noroccidente de Córdoba. En: J. O. Rangel-ch. (Ed.), *Colombia Diversidad Biótica XII. La región Caribe de Colombia*. Pp.: 923-961. Bogotá, Colombia. 1046 p.

Vaccaro, S., Arturi, M., Goya, J., Frangi, J. & Piccolo, G. (2003). Almacenaje de carbono en estadios de la sucesión secundaria en la provincia de Misiones, Argentina. *Interciencia* Vol. 28 (9), 521-527.