



Variaciones de la densidad de la madera: implicaciones en el cálculo del carbono almacenado en capueras de Misiones, Argentina

Variations in wood density: implications for the calculation of carbon stocks in capueras of Misiones, Argentina

Rocío Lara Arcidiácono^{1*}, Carla Taraborelli², Luis Ritter³, Guillermo Martínez Pastur¹ y Juan Manuel Cellini²

¹ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Centro Austral de Investigaciones Científicas. Ushuaia, Argentina.

² Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Laboratorio de Investigaciones en Maderas. La Plata, Argentina.

³ Universidad Nacional de Misiones. Facultad de Ciencias Forestales. Eldorado, Misiones, Argentina.

* Autora de correspondencia.
rocioarcidiacono@conicet.gov.ar

RESUMEN

Las variaciones en la medición de densidad, la inexistencia de datos por especie y la diversidad de expresión de densidades generan inexactitudes en los valores finales de biomasa que, en consecuencia, generan imprecisiones de los valores de existencias de carbono. El objetivo de este trabajo fue determinar la densidad anhidra (peso seco/volumen seco) de 14 especies forestales propias de capueras de la provincia de Misiones y compararlas con valores de densidad obtenidos de bibliografía, tanto de los valores en sí, como de su validez en cálculos de existencias de carbono en un inventario forestal (IF). Se recolectaron tres rodajas de madera con corteza por especie de tres ejemplares distintos a 1.3 m de altura, las mismas se dividieron en tres secciones: corteza (C), xilema exterior (E) y xilema interior (I), determinando su densidad anhidra según norma IRAM 9544 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación). Se obtuvo un promedio ponderado por especie con los valores de área y densidad por sección, y se contrastó con datos bibliográficos. Se compararon los resultados de existencias de carbono por estrato de un IF utilizando las densidades obtenidas en este trabajo y las encontradas en la bibliografía. Para todas las especies se encontraron diferencias significativas entre la densidad anhidra de C e I. Se generó una diferencia máxima de existencias de carbono de $4.13 \text{ t ha}^{-1} \pm 9.71 \text{ t ha}^{-1}$, lo que representa una disminución de 100 344.6 t de carbono total en el estrato con mayor presencia de especies nativas (*Nectandra*). Se sugiere incluir C, I y E a las metodologías de medición de densidad, y utilizar estos valores en la estimación de carbono almacenado, contribuyendo a estimaciones más precisas.

PALABRAS CLAVE: densidad anhidra, corteza, existencias de carbono, inventario de carbono, vegetación secundaria, aprovechamiento.

ABSTRACT

Variations in density measurement, the lack of data by species and the diversity of expression of densities generate inaccuracies in the final biomass values, which consequently generate inaccuracies in the carbon stock values. The objective of this research was to determine the anhydrous density of 14 forest species typical of capueras of Misiones province and compare them with density values reported in the bibliography, both the values themselves and their performance in calculations of carbon stocks in a forest inventory (FI). Three slices of wood with bark per species were collected from three different specimens at a height of 1.3 m. They were divided into three sections: bark (C), outer xylem (E) and inner xylem (I), determining their anhydrous density according to IRAM 9544 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación). A weighted average was obtained per species with area and density values per section, and it was compared against bibliographic data. The results of carbon stocks per stratum of an FI were compared using the anhydrous densities of this work and bibliographic ones. For all species, significant differences were found between the anhydrous density of C and I. A maximum difference in carbon stocks of $4.13 \pm 9.71 \text{ t ha}^{-1}$ was generated, which represents a decrease of 100 344.6 t of total carbon in the stratum with the highest presence of native species (*Nectandra*). It is suggested to include the C, E, and I in density measurement methodologies and to use these values in the estimation of fixed carbon, contributing to more accurate estimates.

KEYWORDS: anhydrous density, bark, carbon stocks, carbon forest inventory, secondary vegetation, logging.

INTRODUCCIÓN

El cálculo de biomasa, carbono almacenado, sus existencias y variaciones en bosques toman relevancia debido al interés por cuantificar tanto el impacto antrópico como la recuperación de ambientes naturales (Velázquez-Pérez et al., 2019). En este marco, se desarrollan técnicas y metodologías de medición y cuantificación de biomasa (Arias Maldonado et al., 2023; Chaves et al., 2023). La densidad de la madera (aparente, anhidra, básica, entre otras) es un dato empleado en estas metodologías, y presenta diversos y numerosos factores de variación. Entre ellos se encuentran la localización geográfica, la metodología de medición, la altura de la toma de muestra, la especie considerada e incluso entre individuos de una misma especie. Estas diferencias tienen una explicación tanto desde la estructura anatómica de la madera como del hábito de crecimiento (Mayard et al., 2022). Analizando los tejidos presentes en el fuste de un árbol en el sentido transversal, encontramos desde afuera hacia el interior: la corteza, el floema, el xilema y la médula. Estos tejidos presentan variaciones de composición tanto anatómica como química (Fengel y Wegener, 1989; Wang et al., 2021). El xilema o leño a su vez se diferencia en albura (leño activo, externo) y duramen (leño inactivo, interno). Este último se genera en un proceso denominado duraminización, el cual consiste en la acumulación de productos metabólicos secundarios inhibitorios o tóxicos para las células vivas y depende también de la edad, especie y condiciones ambientales (Esau, 1982; Medeiros et al., 2021). Las características propias de la anatomía, tanto de la madera como de la corteza, determinan su densidad, tales como grosor de las paredes de las fibras o traqueidas, número y diámetro de lúmenes, y número de células parenquimáticas (Alzamora Choque y Zuluaga Limachi, 2023; Fengel y Wegener, 1989). Asimismo, en términos ecológicos, las especies pioneras presentan menores densidades que las especies climácicas, mientras que las secundarias no presentan un patrón (Medina, 2020).

En el ámbito forestal, para el cálculo de biomasa y carbono almacenado, aún se utilizan valores de densidad

(aparente, anhidra, básica, entre otras) calculados con base en los usos convencionales de la madera, como madera comercial aserrada sin corteza. En algunos trabajos recomiendan la densidad básica (la cual relaciona el peso seco sobre el volumen verde) (Oficina Española de Cambio Climático [OECC], 2019) o la densidad anhidra (la cual relaciona el peso seco sobre el volumen seco), en otros mencionan “densidad de la madera” sin especificar a cuál se refiere (Arias Maldonado et al., 2023). En ninguno de los casos se menciona a qué contenido de humedad la obtienen pudiendo generar comparaciones inadecuadas. Asimismo, las normativas existentes de cálculo de densidad en Argentina se encuentran enfocadas en usos convencionales, como el aserrado. La norma IRAM 9544 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación [IRAM], 1985) establece las pautas para la determinación de la densidad anhidra de la madera, definida como el peso sobre el volumen al 0% de contenido de humedad; de esta forma las densidades definidas por la normativa Argentina no serían óptimas para los cálculos de biomasa, dado que la industria forestal desestima partes del árbol, como la corteza, la cual no cuenta con propiedades adecuadas para su procesamiento industrial. Sin embargo, forma parte de la biomasa del árbol y es incluida en los cálculos de carbono. Para la provincia de Misiones, Argentina, las densidades utilizadas son calculadas sobre árboles aprovechados que presentan dimensiones maderables (> 40 cm de diámetro a 1.3 m o diámetro a la altura de pecho - DAP) y no se diferencia la corteza, desconsiderando las variaciones que existen de la densidad a lo largo del radio del fuste. De esta manera, los cálculos de biomasa que se realizan con datos de tablas elaboradas para otros objetivos pueden generar inexactitudes.

Por otro lado, en Misiones, el aprovechamiento sin manejo técnico de los bosques y el cambio de uso de suelo hacia la agricultura generan áreas de bosque degradado y sucesiones secundarias llamadas “capueras” (Keller et al., 2022). Estas áreas se caracterizan por la colonización de especies de etapas iniciales de la sucesión vegetal luego de un disturbio, por ejemplo, áreas que tuvieron cambios de uso de suelo (implantación de cultivos o incendios, entre otros) o un aprovechamiento forestal intensivo (Campa-



nello et al., 2021; Leszczuk et al., 2022; Zang y Haugg, 2023). Por esta razón, las capueras pueden incluir tanto zonas en recuperación como de bosque nativo degradado por el aprovechamiento. En estas áreas es común encontrar especies arbustivas, árboles pequeños, cañaverales y especies pioneras (Vaccaro et al., 2003; Reutemann, 2015). Estas selvas se encuentran colonizadas por especies pioneras, secundarias iniciales y secundarias tardías características, las cuales presentan un limitado interés dado que no tienen un uso comercial actual; no así las especies climácicas que son las de mayor densidad (Carvalho, 2003; Medina et al., 2019). Sin embargo, estas especies son parte de la biomasa del bosque y la misma se cuantifica para los cálculos tanto de existencias como de fijación de carbono (Aguirre et al., 2022; Cortés-Pérez et al., 2021). Los distintos niveles de aprovechamiento o intensidades de disturbios sobre los bosques generan una gama de posibilidades en cuanto a la densidad de individuos por hectárea y cobertura de especies. En un inventario forestal (IF) esta gama se simplifica para su muestreo a través de estratos (Cortés-Pérez et al., 2021; Llovet Villamayor 2023), los bosques pertenecientes a un estrato representan estructuras forestales similares. Para calcular las existencias de carbono en un bosque se utilizan datos de densidad por especie para el cálculo de biomasa, y a partir de esta se obtienen las existencias de carbono. Utilizar distintos valores de densidad, exactos o no, podrían generar resultados diferentes de biomasa y, en consecuencia, distintos valores de carbono.

Debido a lo expuesto, se espera: a) encontrar diferencias de densidad entre la corteza y el xilema, pero no entre las distintas secciones del xilema; b) obtener valores menores de densidad con respecto a los valores registrados en la bibliografía; y c) encontrar diferencias en el carbono almacenado en los estratos degradados, al utilizar las densidades de madera de la bibliografía contra las obtenidas en este trabajo. Específicamente se busca responder las preguntas: a) ¿Existen diferencias en la densidad anhidra de la corteza, el xilema externo o interno?; b) ¿Cuál es la variación en el valor de densidad, considerando el valor calculado y el obtenido de la bibliografía, para las especies

analizadas?; c) Las existencias de carbono por estrato obtenidos en un IF ¿serán diferentes utilizando las densidades anhidras de este trabajo, respecto a las densidades de la bibliografía?

OBJETIVOS

Determinar la densidad anhidra de madera y corteza de 14 especies forestales propias de capueras de la provincia de Misiones, Argentina, y compararla con valores registrados en la bibliografía; tanto de los valores en sí, como de su validez para los cálculos de existencias de carbono en un inventario forestal.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El trabajo se realizó en la reserva de la biosfera Yabotí, Misiones, Argentina (Fig. 1), la cual abarca parte de los departamentos Guaraní y San Pedro. En ella se lleva a cabo un programa de manejo en un marco de desarrollo sustentable; estas áreas pertenecen a la Selva Paranaense (Ley Provincial XVI – N° 33, antes Ley 3041).

Muestreo

Se identificaron en campo tres áreas de fácil acceso, que fueron intensamente aprovechadas en el pasado. En cada área y de cada especie arbórea, se seleccionaron un máximo de dos ejemplares de entre 3 cm y 10 cm de diámetro a 1.3 m de altura (DAP). De cada individuo se extrajo una rodaja de madera con corteza a esa misma altura. Las especies fueron: *Campomanesia xanthocarpa* O. Berg (CAXA), *Cedrela fissilis* Vell. (CEFI), *Chrysophyllum marginatum* (Hook. & Arn.) Radlk. (CHMA), *Lonchocarpus muehlbergianus* Hassl. (LOMU), *Luebea divaricata* Mart. (LUDI), *Muelleria campestris* (Mart. ex Benth.) M.J. Silva & A.M.G. Azevedo (MUCA), *Nectandra lanceolata* Nees & Mart. (NELA), *Nectandra megapota mica* (Spreng.) Mez (NEME), *Parapiptadenia rigida* (Benth.) Brenan (PARI), *Pilocarpus pennatifolius* Lem. (PIPE), *Sebastiania commersoniana* (Baill.) L.B.Sm. & Downs (SECO), *Solanum granuloso-leprosum* Dunal (SOGR), *Trema micrantha*

(L.) Blume (TRMI) y *Trichilia clausenii* C. DC. (TRCL). Cada rodaja se dividió en tres secciones: corteza (C), xilema exterior (E) y xilema interior (I) (determinados los últimos dos por la mitad del radio de la muestra sin corteza) y se obtuvieron al menos tres muestras por sección (Fig. 2) de un peso mínimo de 0.5 g.

Valor de densidad por muestra

Todas las muestras se secaron en estufa a $102\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta peso constante y tal peso se registró como peso anhidro. Posteriormente, para cada muestra se determinó el volumen a 0% de contenido de humedad, por el método de desplazamiento de fluidos, con balanza de resolución

$\pm 0,005\text{ g}$ (“Ohaus Pioneer”). Se procedió según la norma IRAM 9544 (IRAM, 1985), que establece las pautas para la determinación de la densidad anhidra de la madera (Ecuación 1).

$$D0 = \frac{P0}{V0} \quad (1)$$

donde:

$D0$: densidad anhidra (g cm^{-3})

$P0$: peso a 0% de contenido de humedad

$V0$: volumen a 0% de contenido de humedad



FIGURA 1. Mapa de la ubicación de la Reserva Biosfera Yabotí, Misiones, Argentina.

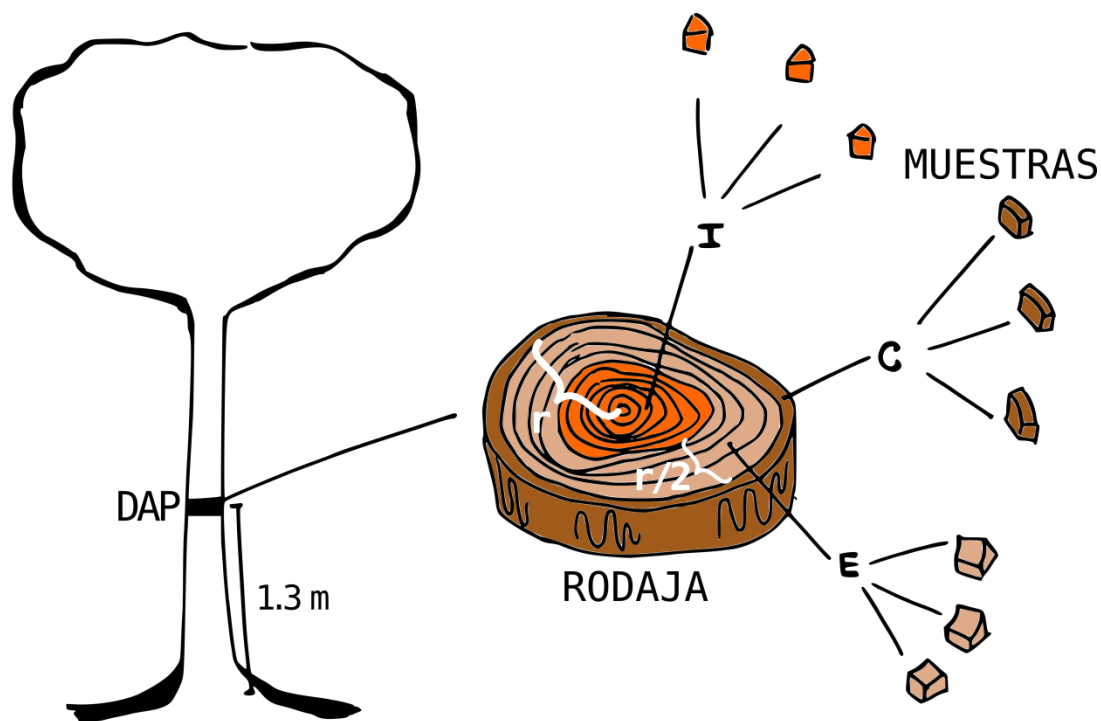


FIGURA 2. Esquema de toma y procesamiento de muestras.

C: corteza, E: Xilema exterior, I: Xilema interior, DAP: diámetro a 1.3 m de altura, r: radio.

Valor de densidad anhidra por especie

Con el fin de obtener un valor único de densidad anhidra por especie, se midió en cada rodaja el área de cada sección (corteza, xilema exterior, y xilema interior) utilizando el programa IP-Win32, y se calcularon sus respectivos valores porcentuales promedio respecto del área total de la rodaja. Se realizó un promedio ponderado para cada rodaja, con los valores porcentuales de área y promedios de densidad anhidra por sección. Estos valores fueron promediados por especie y contrastados con los obtenidos de la bibliografía.

Inventario forestal y cálculo de existencias de carbono

Se utilizaron datos de existencias de carbono por especie y por unidad de muestreo (UM) de un IF de existencias de carbono realizado en las inmediaciones de los sitios de recolección de las rodajas (Latitud 26° 56' 37.76" S; Longitud 53° 57' 51.62" O). Cada UM se compone de seis parcelas circulares: dos concéntricas, una de 1000 m² (A) y otra de 255 m² (B); y cuatro de 50 m² cada una (M),

distanciadas 17.8 m del centro de la UM en dirección N, E, S, O. Los árboles muestreados en A fueron los de DAP ≥ 20 cm y en B los que poseían un DAP ≥ 5 cm y < 20 cm. Por último, se muestrearon en M los individuos leñosos de DAP < 5 cm y ≥ 2 cm de diámetro a 0.1 m altura (DAB). Para A, B y M se registraron valores de DAP. Para M, además, se registraron los valores de diámetro de copa, DAB y altura total. Se realizó una estratificación considerando las existencias de carbono (kg) por especie por UM. Para esto, se realizó un análisis de conglomerados (AC), definido como un análisis multivariado de agrupamiento jerárquico aglomerativo. El método de distancia utilizado fue Bray-Curtis (Bray y Curtis, 1957), recomendado debido a que no considera las ausencias compartidas en favor de la similitud (Bottan, 2022; Holguín-Estrada et al., 2021; Manzanilla Quijada et al., 2020). El algoritmo de agrupamiento que se utilizó fue Ward (Zerecero-Salazar et al., 2024), el cual busca minimizar la variación dentro de cada grupo con respecto a los nuevos grupos que se van formando a partir de

encontrar la distancia euclidiana mínima entre las parcelas y los centroides de su grupo correspondiente (Murtagh y Legendre, 2014). Este método de agrupamiento evita o merma el “efecto cadena” (Lencinas et al., 2024). Se obtuvo un dendrograma que muestra las relaciones jerárquicas entre las UM, según sus valores de similitud. De acuerdo con los grupos formados y para analizar cómo incide el uso de la densidad calculada considerando la corteza en los valores finales de un IF, se agruparon las parcelas en tres estratos. Estos se nombraron según las especies predominantes como: estrato “Araucaria”, representado por plantaciones de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, con un sotobosque dominado por *N. megapotamica* y *M. campestris*, el estrato “Pinus” por plantaciones de *Pinus taeda* L. y plantaciones de *A. angustifolia* con un sotobosque dominado por *Machaerium paraguayense* Hassl. Y, por último, el estrato “Nectandra” que representa parcelas ubicadas dentro del bosque nativo, que fue intensamente aprovechado; en este, el principal aporte a las existencias de carbono lo hacen las especies *N. megapotamica*, *Holocalyx balansae* Micheli y *Diatenopteryx sorbifolia* Radlk.

Para el cálculo de la biomasa por individuo se utilizaron las funciones recopiladas por Maggio y Cellini (2016). En los casos en los que la especie no se encontrara en dicha publicación o quedara por fuera del alcance de aplicabilidad de los modelos, la biomasa se calculó con base en las ecuaciones alométricas de Chave et al. (2014). Para los arbustos, se calculó la biomasa a partir de las ecuaciones propuestas por Conti et al. (2019). En el [material complementario](#) de este artículo, se presenta para cada especie, la ecuación utilizada (según intervalo de diámetro y altura del modelo) y la densidad de la madera de algunas de las especies. En los casos en que se lograron precisar modelos de biomasa en determinadas especies, se utilizaron los modelos de volumen (fuste o total) junto a la densidad y el factor de expansión de biomasa (BEF). En todos los casos se consideró la relación raíces/parte aérea propuesta por la United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC] (2013); 0.2, y 0.47 como factor de conversión de carbono.

Para el cálculo de existencias de carbono se utilizaron las ecuaciones 2, 3 y 4:

$$b_{\text{árbol},p,i} = \frac{10000}{\text{sup}_p} \sum_{a=1}^A \text{árbol}, a \quad (2)$$

donde:

$b_{\text{árbol},p,i}$ = biomasa de los árboles por hectárea en la parcela p del estrato i (t ha⁻¹)

sup_p = superficie de la parcela (m²)

A = todos los árboles de la parcela

a = cada árbol de la parcela

árbol = biomasa del árbol (t)

$$b_{\text{árbol},i} = \frac{\sum_{p=1}^{n_i} b_{\text{árbol},p,i}}{n_i} \quad (3)$$

donde:

$b_{\text{árbol},i}$ = biomasa promedio por hectárea en el estrato i (t ha⁻¹)

$b_{\text{árbol},p,i}$ = biomasa de los árboles por hectárea en la parcela p del estrato i (t ha⁻¹)

n_i = número de parcelas en el estrato i

$$C_{\text{árbol},i} = CF_{\text{árbol}} b_{\text{árbol},i} \quad (4)$$

donde:

$C_{\text{árbol},i}$ = existencias de carbono en el estrato i (tCO_{2eq} ha⁻¹)

$CF_{\text{árbol}}$ = fracción de carbono de la biomasa en árboles (0.47).

$b_{\text{árbol},i}$ = biomasa promedio por hectárea en el estrato i (t ha⁻¹)

Los resultados de existencias de carbono según estratos fueron dos: uno con los valores de densidad de madera de la bibliografía y otro modificando únicamente las D0 de las especies presentes en este trabajo.

Análisis de datos

Se realizaron análisis de varianza (Andeva) y pruebas de Tukey ($p < 0.05$) para variables de densidad anhidra de las



especies forestales, considerando como factor la sección analizada (C, E, I) (Barotto 2021; Fernández et al., 2019). Asimismo, las variables de diferencias de carbono en porcentaje fueron analizadas con Andeva y pruebas de Tukey ($p < 0.05$), utilizando como factores los estratos del inventario forestal (Araucaria, Pinus y Nectandra). En todos los casos se revisó la normalidad mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov, mientras que la homogeneidad de variancias (homocedasticidad) se analizó mediante la prueba de Levene. En caso de incumplimiento de supuestos, se aplicaron métodos no paramétricos (Kruskal-Wallis) y las diferencias se determinaron mediante comparaciones de medias con la prueba de Conover-Iman a $p < 0.05$. Para los análisis estadísticos se utilizó el programa InfoStat (Di Rienzo et al., 2015).

RESULTADOS

Las rodajas obtenidas estuvieron en un intervalo de 3.65 cm a 9.50 cm de diámetro. El peso y volumen promedio de las muestras fue 3.6 g y 6.5 cm³ respectivamente. En la tabla 1 se presenta una descripción de la dispersión de valores de D0 y DAP de los ejemplares muestreados a través de valores mínimos, máximos, promedios y desviaciones estándar. Los valores de D0 por sección (Tabla 2) describen diferencias significativas entre la corteza y la sección interna en todas las especies; pudiendo la corteza presentar una mayor o menor densidad que las secciones interiores. Para CEFI, LUDI, NELA, PARI, SOGR, TRMI y TRCL, las D0 de las secciones externa e interna no presentaron diferencias significativas, pero sí estas dos respecto de la corteza, la cual tuvo mayor D0 ($C > E = I$). Para PIPE y SECO los valores para la sección externa e interna no presentaron diferencias, pero sí al compararlas con la corteza, la cual exhibió valores menores ($E = I > C$). En el caso de CHMA, MUCA y NEME existieron diferencias entre los valores de D0 en las tres secciones, presentando un aumento de D0 desde la corteza hacia el interior ($C > E > I$). CAXA y LOMU presentaron diferencias en D0 entre la corteza y la sección interna, pero no respecto de la

externa que se encontró en un intermedio entre las dos anteriores (las secciones analizadas para LOMU se comportaron como $(C > I) = E$ y las secciones de CAXA como $(C < I) = E$).

Con los valores obtenidos de la bibliografía, se calcularon valores promedio de densidad por especie (Tabla 3). Asimismo, se exponen en esta tabla los valores de D0 por especie obtenidos del promedio ponderado de área de cada sección por el D0 de la sección; estos resultaron menores que los de bibliografía en todas las especies, con excepción de NEME y TRCL. Dentro de las especies con D0 menor que la bibliografía se puede mencionar a CHMA, PIPE, SECO y LOMU; con valores menores al bibliográfico en las tres secciones analizadas. Para CEFI, LUDI, MUCA, NELA, PARI, SOGR, los valores menores fueron encontrados en las secciones I y E, mientras que C presentó un mayor valor de densidad de la madera respecto de la bibliografía para la especie. Con CAXA, la situación es intermedia, ya que la corteza y la sección externa son menos densas que el dato de bibliografía, pero el interno es mayor. En segundo lugar, NEME y TRCL presentan densidades mayores que las bibliográficas, dado por una mayor densidad de la sección E y C el primer caso, y de las tres secciones en la segunda especie.

Al comparar los porcentajes de diferencia de existencias de carbono según estratos del IF, el estrato Pinus presenta el valor menor (0.70%) respecto de los estratos Araucaria y Nectandra (Tabla 4). Las mayores diferencias se encuentran en el grupo b (Nectandra y Araucaria).

Estas diferencias, generadas únicamente a partir de la modificación de la densidad de 14 especies, representan para el IF una disminución en el estrato Nectandra de 100 344.6 t de carbono total; este valor fue de 405.0 t para el estrato Pinus y 2299.9 t para el estrato Araucaria. Aunque estos valores son mayores para Nectandra por ser el estrato de mayor superficie, también es el que describe mayor diferencia de existencias de carbono, en toneladas por hectárea (Tabla 4).

TABLA 1. Valores calculados de densidad anhidra de madera y corteza obtenidas a 1.3 m de altura de especímenes de 14 especies colectadas en capueras de Misiones, Argentina.

| Especie | Sección | Densidad anhidra (g cm ⁻³) | | DAP (cm) | |
|------------------------------|---------|--|------|-------------------|-----|
| | | Mín (PROM ± SD) | Máx | Mín (PROM ± SD) | Máx |
| <i>P. rigida</i> | C | 0.94 (1.05 ± 0.06) | 1.12 | 4.5 (5.18 ± 0.58) | 5.9 |
| | E | 0.69 (0.78 ± 0.06) | 0.83 | | |
| | I | 0.75 (0.77 ± 0.02) | 0.80 | | |
| <i>C. marginatum</i> | C | 0.61 (0.65 ± 0.03) | 0.70 | 6.2 (7.10 ± 0.53) | 8.0 |
| | E | 0.58 (0.61 ± 0.02) | 0.64 | | |
| | I | 0.51 (0.56 ± 0.03) | 0.63 | | |
| <i>S. commersoniana</i> | C | 0.49 (0.56 ± 0.04) | 0.63 | 4.2 (4.45 ± 0.25) | 4.7 |
| | E | 0.58 (0.61 ± 0.03) | 0.66 | | |
| | I | 0.57 (0.63 ± 0.05) | 0.71 | | |
| <i>C. fissilis</i> | C | 0.50 (0.56 ± 0.05) | 0.63 | 5.2 (6.95 ± 1.81) | 9.5 |
| | E | 0.29 (0.33 ± 0.03) | 0.39 | | |
| | I | 0.25 (0.29 ± 0.03) | 0.35 | | |
| <i>S. granuloso-leprosum</i> | C | 0.39 (0.43 ± 0.04) | 0.50 | 4.4 (4.79 ± 0.33) | 5.2 |
| | E | 0.37 (0.39 ± 0.01) | 0.42 | | |
| | I | 0.31 (0.36 ± 0.03) | 0.39 | | |
| <i>C. xanthocarpa</i> | C | 0.65 (0.73 ± 0.07) | 0.68 | 3.9 (4.11 ± 0.20) | 4.3 |
| | E | 0.69 (0.76 ± 0.05) | 0.85 | | |
| | I | 0.74 (0.84 ± 0.06) | 0.94 | | |
| <i>N. lanceolata</i> | C | 0.56 (0.65 ± 0.06) | 0.71 | 4.5 (5.21 ± 0.73) | 6.2 |
| | E | 0.30 (0.34 ± 0.03) | 0.37 | | |
| | I | 0.24 (0.33 ± 0.05) | 0.38 | | |
| <i>N. megapotamica</i> | C | 0.79 (0.84 ± 0.03) | 0.88 | 5.9 (7.06 ± 1.31) | 9 |
| | E | 0.44 (0.51 ± 0.05) | 0.61 | | |
| | I | 0.40 (0.44 ± 0.04) | 0.51 | | |
| <i>T. micrantha</i> | C | 0.65 (0.81 ± 0.11) | 0.99 | 4.6 (5.04 ± 0.61) | 5.9 |
| | E | 0.26 (0.32 ± 0.03) | 0.37 | | |
| | I | 0.22 (0.27 ± 0.04) | 0.32 | | |
| <i>P. pennatifolius</i> | C | 0.73 (0.78 ± 0.05) | 0.84 | 4.7 (5.91 ± 0.94) | 6.7 |
| | E | 0.83 (0.91 ± 0.05) | 1.01 | | |
| | I | 0.88 (0.95 ± 0.05) | 1.05 | | |
| <i>L. muehlbergianus</i> | C | 0.54 (0.61 ± 0.04) | 0.65 | 3.0 (3.74 ± 0.49) | 4.5 |
| | E | 0.51 (0.57 ± 0.02) | 0.60 | | |
| | I | 0.50 (0.55 ± 0.03) | 0.58 | | |
| <i>L. campestris</i> | C | 0.92 (0.97 ± 0.04) | 1.02 | 4.4 (4.95 ± 0.56) | 5.5 |
| | E | 0.67 (0.70 ± 0.03) | 0.77 | | |
| | I | 0.62 (0.66 ± 0.03) | 0.72 | | |
| <i>T. clausenii</i> | C | 0.93 (1.08 ± 0.11) | 1.27 | 4.2 (5.19 ± 0.89) | 6.4 |
| | E | 0.71 (0.75 ± 0.03) | 0.80 | | |
| | I | 0.71 (0.78 ± 0.04) | 0.85 | | |
| <i>L. divaricata</i> | C | 0.59 (0.81 ± 0.13) | 0.95 | 3.6 (4.40 ± 0.56) | 4.9 |
| | E | 0.45 (0.50 ± 0.04) | 0.57 | | |
| | I | 0.34 (0.43 ± 0.06) | 0.50 | | |

DAP: diámetro a 1.3 m de altura del espécimen en pie; Mín: mínimo; Máx: máximo; PROM: promedio; SD: desviación estándar.



TABLA 2. Resultados del análisis de varianza y prueba de Tukey para los valores de densidad anhidra calculados para madera y corteza de 14 especies maderables de capueras de Misiones, Argentina.

| Medias de densidad anhidra por especie (g cm ⁻³) | | | | | | | |
|--|----------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|
| Secciones | CAXA | CEFI | CHMA | LOMU | LUDI | MUCA | NELA |
| C | 0.682 a | 0.559 b | 0.653 c | 0.610 b | 0.813 b | 0.971 c | 0.651 b |
| E | 0.761 ab | 0.333 a | 0.611 b | 0.575 ab | 0.503 a | 0.704 b | 0.341 a |
| I | 0.839 b | 0.295 a | 0.563 a | 0.546 a | 0.430 a | 0.661 a | 0.332 a |
| Estadísticos | | | | | | | |
| p | 0.0014 | <0.0001 | <0.0001 | 0.0033 | <0.0001 | <0.0001 | <0.0001 |
| Coef F | 8.626 | 160.481 | 28.520 | 7.722 | 65.396 | 190.416 | 136.557 |
| Secciones | NEME | PARI | PIPE | SECO | SOGR | TRMI | TRCL |
| C | 0.842 c | 1.055 b | 0.777 a | 0.561 a | 0.429 b | 0.811 b | 1.085 b |
| E | 0.507 b | 0.779 a | 0.905 b | 0.609 b | 0.387 a | 0.320 a | 0.754 a |
| I | 0.442 a | 0.775 a | 0.947 b | 0.629 b | 0.357 a | 0.271 a | 0.775 a |
| Estadísticos | | | | | | | |
| p | <0.0001 | <0.0001 | <0.0001 | 0.0018 | <0.0001 | <0.0001 | <0.0001 |
| Coef F | 304.272 | 100.026 | 26.239 | 7.809 | 15.334 | 191.711 | 65.496 |

C: corteza; E: xilema externo; I: xilema interno; CAXA: *Campomanesia xanthocarpa* O.Berg; CEFI: *Cedrela fissilis* Vell.; CHMA: *Chrysophyllum marginatum* (Hook. & Arn.) Radlt.; LOMU: *Lonchocarpus muehlbergianus* Hassl.; LUDI: *Luehea divaricata* Mart.; MUCA: *Muelleria campestris* (Mart. ex Benth.) M.J. Silva & A.M.G. Azevedo; NELA: *Nectandra lanceolata* Nees & Mart.; NEME: *Nectandra megapotamica* (Spreng.) Mez; PARI: *Parapiptadenia rigida* (Benth.) Brenan; PIPE: *Pilocarpus pennatifolius* Lem., SECO: *Sebastiania commersoniana* (Baill.) L.B.Sm. & Downs, SOGR: *Solanum granuloso-leprosum* Dunal, TRMI: *Trema micrantha* (L.) Blume, TRCL: *Trichilia clausenii* C. DC. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

DISCUSIÓN

En este trabajo se observaron diferencias significativas en los valores de D0 para todas las especies estudiadas entre la corteza (C) y el xilema (E+I). En 11 de 14 especies, la densidad de la corteza fue mayor que la D0 calculada para estas especies. Estas diferencias podrían responder a las diferencias de densidad de los tejidos en el sentido radial del tronco (desde el interior hacia el exterior: médula, duramen, albura, corteza) (Alzamora Choque y Zuluaga Limachi, 2023; Fengel y Wegener, 1989). En el análisis por secciones no se observó un patrón respecto de las relaciones entre la densidad de la corteza y las secciones del xilema; correspondiéndose con los resultados obtenidos por Neumann y Lawes (2021). Estos autores trabajaron con los géneros *Allocasuarina*, *Callitris* y *Eucalyptus* en Australia y mencionan que la relación entre la densidad básica del xilema y la de la corteza es de 1.013 ± 0.247 (con un intervalo de 0.6 a 2.28). Miranda y Pereira (2016) y Neumann et al. (2020) mencionan, para el género

Eucalyptus, densidades de corteza desde 17% hasta 50% menor que la del xilema, y Miles y Smith (2009) señalan, para *Robinia pseudoacacia*, densidades de corteza 127% menor que el xilema. A su vez, para los géneros *Salix* y *Tilia*, la corteza presenta una mayor densidad que el xilema, siendo 39% y 33% mayor, respectivamente (Miles y Smith, 2009). Para *Quercus rubra*, esta diferencia es de 18%, *Melia azedarach*, *Yucca brevifolia* y *Tamarix* spp. presentan valores similares de densidad entre la corteza y el xilema, con 2% de diferencia (Miles y Smith, 2009). Las suposiciones de que la densidad del xilema es equivalente a la de la corteza puede generar errores de hasta 200% (Miles y Smith, 2009). El carbono de la corteza del árbol aumenta exponencialmente con el diámetro del árbol a la altura del pecho (Sinan et al., 2024). No obstante, las proporciones de corteza disminuyen de 63% para plántulas de 2 cm a 23% en árboles de 50 cm (Neumann y Lawes, 2021). En la búsqueda bibliográfica realizada para las densidades, solo una de las 25 citas incluye datos de densidades de muestras con corteza (Neumann y Lawes, 2021).

TABLA 3. Comparación de densidad anhidra obtenida de bibliografía con la obtenida en este trabajo.

| Var | Densidad anhidra (g cm ⁻³) | | | | | | | | | | | | | |
|-------|--|-----------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|---------------------|--------------------|----------------------|---------------------|
| | Especies | | | | | | | | | | | | | |
| | CAXA | CEFI | CHMA | LOMU | LUDI | MUCA | NELA | NEME | PARI | PIPE | SECO | SOGR | TRMI | TRCL |
| | 0.73 ⁵ | 0.53 ¹ | 0.79 ¹ | 0.72 ¹ | 0.62 ¹ | 0.69 ⁴ | 0.53 ¹ | 0.52 ⁴ | 0.85 ¹ | 1.03 ¹ | 0.63 ¹² | 0.404 ⁹ | 0.41 ¹ | 0.674 ²⁰ |
| | 0.87 ¹² | 0.34 ⁶ | 0.645 ⁹ | 0.69 ⁴ | 0.5 ⁴ | 0.89 ¹² | 0.52 ⁴ | 0.46 ²³ | 0.62 ⁴ | | 0.643 ²⁵ | | 0.45 ² | |
| | 0.747 ²⁵ | 0.473 ⁷ | 0.78 ¹² | 0.602 ⁷ | 0.516 ⁷ | | 0.45-0.5 ¹⁹ | | 0.78 ¹⁷ | | | | 0.425 ³ | |
| | | 0.39 ⁸ | | 0.54 ¹⁰ | 0.533 ⁹ | | 0.44 ²³ | | 1.07 ²⁵ | | | | 0.3-0.4 ⁵ | |
| | | 0.55 ¹² | | 0.72 ¹² | 0.64 ¹² | | | | | | | | 0.4 ¹¹ | |
| | | 0.5-0.6 ¹³ | | 0.71 ¹⁷ | 0.6-0.7 ¹⁵ | | | | | | | | 0.453 ¹⁴ | |
| | | 0.48 ¹⁶ | | | 0.62 ¹⁹ | | | | | | | | 0.2 ²¹ | |
| | | 0.46 ¹⁷ | | | | | | | | | | | 0.245 ²² | |
| | | 0.42 ¹⁸ | | | | | | | | | | | | |
| | | 0.55 ¹⁹ | | | | | | | | | | | | |
| | | 0.54 ²⁴ | | | | | | | | | | | | |
| DPb | 0.782 | 0.486 | 0.738 | 0.664 | 0.591 | 0.79 | 0.488 | 0.49 | 0.830 | 1.03 | 0.637 | 0.404 | 0.365 | 0.674 |
| DEPb | 0.076 | 0.075 | 0.081 | 0.141 | 0.075 | 0.069 | 0.041 | 0.042 | 0.187 | - | 0.009 | - | 0.093 | - |
| DO | 0.765 | 0.359 | 0.604 | 0.570 | 0.525 | 0.712 | 0.376 | 0.533 | 0.805 | 0.898 | 0.607 | 0.385 | 0.357 | 0.812 |
| DEO | 0.200 | 0.080 | 0.187 | 0.190 | 0.136 | 0.226 | 0.086 | 0.136 | 0.228 | 0.259 | 0.175 | 0.117 | 0.085 | 0.177 |
| Pb-DO | 0.061 | 0.127 | 0.134 | 0.093 | 0.067 | 0.078 | 0.112 | -0.04 | 0.025 | 0.132 | 0.029 | 0.019 | 0.007 | -0.138 |

DPb: Densidad promedio bibliografía, DEPb: desviación estándar de datos de densidad bibliográficos, DO: Densidad anhidra calculada, DEO: desviación estándar de los datos de densidad anhidra calculados, DPb-DO: Diferencia densidad promedio bibliográfica y densidad anhidra calculada, Max: máximo.

(1) Atencia (2003). (2) Barajas-Morales (1987). (3) Bárcenas et al. (2008). (4) Chudnoff (1980). (5) Détienne et al. (1982). (6) Détienne y Jacquet (1983). (7) Dimitri y Biloni (1973). Leonardi (1975). (8) Fearnside (1997). (9) Giménez y Moglia (2003). (10) Gutiérrez Rojas y Silva Sandoval (2000). (11) Little y Wadesworth (1964). (12) Lorenzi (1992). (13) Loureiro y Lisboa (1979). (14) Quintanar-Isaías et al. (2012). (15) Richter y Dallwitz (2000). (16) Riesco Muñoz et al. (2019). (17) Rodríguez (2015). (18) ter Steege y Hammond (2001). (19) Tortorelli (1956). (20) Trautenmüller et al. (2015). (21) Van Gelder et al. (2006). (22) Wiemann y Williamson (1989). (23) Heerd y Ferreira de Melo (2016). (24) Moya et al. (2013). (25) Martins (1944). CAXA: *Campomanesia xanthocarpa* O.Berg, CEFI: *Cedrela fissilis* Vell., CHMA: *Chrysophyllum marginatum* (Hook. & Arn.) Radlk., LOMU: *Lonchocarpus muehlbergianus* Hassl., LUDI: *Luehea divaricata* Mart., MUCA: *Muellera campestris* (Mart. ex Benth.) M.J. Silva & A.M.G. Azevedo, NELA: *Nectandra lanceolata* Nees & Mart., NEME: *Nectandra megapotamica* (Spreng.) Mez, PARI: *Parapiptadenia rigida* (Benth.) Brenan, PIPE: *Pilocarpus pennatifolius* Lem., SECO: *Sebastiania commersoniana* (Baill.) L.B.Sm. & Downs, SOGR: *Solanum granuloso-leprosum* Dunal, TRMI: *Trema micrantha* (L.) Blume, TRCL: *Trichilia clausenii* C. DC.

TABLA 4. Diferencias en las existencias de carbono para un Inventario Forestal utilizando por un lado las densidades de bibliografía y por otro las densidades anhidras calculadas en este trabajo.

| Estrato | n | Sup | ExC _{bibl} | ExC _{calc} | % Dif de C |
|-----------|----|---------|-----------------------|-----------------------|---------------|
| | | (ha) | (t ha ⁻¹) | (t ha ⁻¹) | |
| Araucaria | 30 | 821.4 | 129.0 | 126.2 | 2.11 ± 2.22 b |
| Pinus | 33 | 1350.1 | 42.6 | 42.3 | 0.70 ± 0.73 a |
| Nectandra | 81 | 22298.8 | 108.0 | 103.5 | 4.13 ± 9.71 b |
| H | | | | | 26.726 |
| p | | | | | <0.0001 |

n: número de parcelas; Sup: superficie total del estrato; ExC_{bibl}: existencias de carbono obtenidas con densidades de bibliografía; ExC_{calc}: existencias de carbono obtenidas con las densidades anhidras del presente trabajo; % Dif de C: porcentaje de diferencia de carbono del resultado calculado con las densidades obtenidas en el presente trabajo menos las bibliográficas; H: valor del estadístico de prueba para el análisis de Kruskal Wallis, p: probabilidad mediante prueba de Conover-Iman.

Medias con letra en común no presentaron diferencias significativas.



Con excepción de NEME y TRCL, los valores de D0 calculados fueron menores que los promedios bibliográficos. Los individuos muestreados correspondieron a clases diamétricas menores a 10 cm de DAP, por lo que podrían ser árboles jóvenes con procesos incipientes de duraminización. Resultados similares obtuvieron Pereyra y Gelid (2002), quienes encontraron que la densidad de la madera de *Pinus taeda* aumenta con la edad. Densidades menores dentro de una misma especie pueden explicarse también desde las altas tasas de crecimiento en árboles tropicales (Favrichon 1994, Suzuki 1999). Un entorno altamente perturbado otorga ventajas a los árboles propiciando un rápido crecimiento y sugiere que la densidad de la madera se encuentra condicionada a valores menores por el aumento del crecimiento. (ter Steege y Hammond 2001). Asimismo, las especies estudiadas son propias de estados iniciales de la sucesión secundaria de las capueras misioneras (Carvalho, 2003) por lo que presentan menores densidades que las especies climácicas, aunque las secundarias no presentan un patrón definido (Medina, 2020).

En el presente trabajo se consideraron modificaciones únicamente en la densidad de 14 especies. Estas generaron diferencias máximas de existencias de carbono de $4.13 \text{ t ha}^{-1} \pm 9.71 \text{ t ha}^{-1}$ (100 344.6 t en total) para el estrato *Nectandra* y mínimas de $0.70 \text{ t ha}^{-1} \pm 0.73$ para el estrato *Pinus* (405.0 t en total). Estos resultados pueden deberse a una mayor densidad y abundancia de individuos de las especies analizadas en este trabajo en los estratos dominados por *Nectandra* y *Araucaria*, en comparación con el estrato dominado por el género *Pinus*. Esta diferencia se debe principalmente a la incorporación de semillas de especies nativas al suelo de estos estratos, siendo menor en plantaciones de *Pinus* que en bosques nativos (Ritter 2017). Tanto en el cálculo para la biomasa de este estudio, como en el trabajo de Fearnside (1997), el resultado final con la densidad calculada es menor.

Los cálculos realizados para la estimación tanto de biomasa como de existencias de carbono consideran todo el árbol, incluyendo la corteza (Aguirre et al., 2022; Cortés-Pérez et al., 2021). Las normas que estandarizan la

metodología de medición de las distintas densidades de la madera en Argentina (IRAM, 1985) excluyen la corteza. Dado que los valores de densidad anhidra son diferentes para la corteza en comparación con el xilema; y que la corteza representa 13% del carbono total almacenado (Sinan et al., 2024), se sugiere incluirla en la metodología de medición, sumando muestras solo de corteza u obteniendo muestras que incluyan corteza buscando que la misma contemple la diversidad de tejidos presentes en el fuste. Es necesario ampliar la definición de densidades, tanto desde metodologías desarrolladas para el cálculo de carbono como desde la conclusión de cuáles son las densidades óptimas por utilizar y su metodología de obtención por especie.

La elección del valor de densidad para los cálculos de carbono almacenado depende de la disponibilidad de información tanto a escala de especie como el tipo de densidad utilizada. Tomar el valor máximo de densidad cuando en la bibliografía se presentan varias opciones para utilizar (por ejemplo, para una especie diferentes trabajos calculan diferentes valores) o tomar el valor de densidad calculada con el duramen de la madera genera una sobreestimación de carbono en los inventarios. Considerar una densidad desarrollada para el cálculo de biomasa resultaría en un valor de mayor exactitud. Las modificaciones que se realicen sobre los datos usados en las ecuaciones para el cálculo de existencias de carbono generarán variaciones en los resultados finales para un IF. Estos serán mayores o menores dependiendo del valor de densidad, pero también del número de individuos por hectárea y de la distribución diamétrica de las especies en cuestión según estrato. Considerando lo anterior se propone aplicar esto según la estructura forestal del estrato en un IF, particularmente según la presencia de individuos propios de sucesiones secundarias (capueras) tanto en número (individuos por hectárea) como en volumen.

CONCLUSIONES

Se calcularon las densidades anhidras de 14 especies forestales propias de bosques en estadios iniciales de la sucesión secundaria de Misiones, Argentina, exponiendo

diferencias significativas entre la corteza y el xilema. Los resultados de carbono total almacenado calculados con los valores de densidad anhidra de este trabajo y los obtenidos de la bibliografía muestran diferencias significativas entre los valores finales por hectárea, especialmente en el estrato de bosque nativo. Tomando en cuenta que las normas argentinas existentes para la medición de densidad de la madera no consideran la corteza y que esta representa un porcentaje importante del carbono total almacenado por un bosque, se remarca la importancia de incluir a la corteza en los análisis y debatir las metodologías de cálculo de densidad según los fines para las que se aplican. Se puede concluir que el cálculo de biomasa a partir de la densidad anhidra subestima la cantidad de carbono con respecto a la hallada en la bibliografía.

REFERENCIAS

- Aguirre, A. V., Arcidiácono, R. L., Bottan, L., Bautista Berrios, S. V., Cellini, J. M., Churquina, N. N., Kastelanovich, N. P., Miguel Villeda, C. A., & Poulsen, J. (2022). *Cálculo del CO₂eq fijado institucional UNLP*. Dirección de Seguridad, Higiene y Desarrollo Sustentable de la Secretaría de Planeamiento, Obras y Servicios de la UNLP. <https://unlp.edu.ar/wp-content/uploads/2023/03/Informe-fijacion-CO2-UNLP.pdf>
- Alzamora Choque, Y. Y., & Zuluaga Limachi, E. (2023). *Secuestro de carbono anual en Hymenaea courbaril L. usando la microdensitometría de rayos X, en bosques naturales del Tabuamanu-Madre de Dios* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios].
- Arias Maldonado, A., Ferreira, W. J., & De la Barra Ricaldes, N. (2023). Estimación de fijación de carbono en las coberturas vegetales de la Serranía San Pedro (Cochabamba-Bolivia). *Acta Nova*, 11(1), 28–39.
- Atencia, M. E. (2003). Densidad de maderas (kg/m³) ordenadas por nombre común. INTI, CITEMA, Argentina. <https://www.inti.gov.ar/publicaciones/descargac/366>
- Barajas-Morales, J. (1987). Wood specific gravity in species from two tropical forests in Mexico. *LAWA journal*, 8(2), 143-148. <https://doi.org/10.1163/22941932-90001041>
- Bárceñas, P., G. M., Ordoñez-Candelaria, V. R., Manson, R. H., Hernandez-Ortiz, V., Gallina, S., & Mehlreter, K. (2008). Calidad de la madera de los árboles de sombra. *Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz biodiversidad, manejo y conservación. Inecol, INE-Semarnat*.
- Barotto, A. J. (2021). *Significado funcional de la madera en el género Eucalyptus: Relaciones entre microestructura y mecanismos de resistencia a estrés por sequía y heladas* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional de La Plata]. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/119758>
- Bottan, L. (2022). *Caracterización de la composición y estructura de bosques de transición en Traslasierra (Córdoba) en función de la altitud, la precipitación y la temperatura* [Tesis doctoral, Universidad Nacional de La Plata]. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/141571>
- Bray, J. R., & Curtis, J. T. (1957). An ordination of the upland forest communities of southern Wisconsin. *Ecological Monographs*, 27(4), 326-349. <https://doi.org/10.2307/1942268>
- Campanello, P. I., Hilgert, N. I., Pinazo, M., Barth, S., Di Bitetti, M., von Below, J., Arturi, M., Goya, J., Cockle, K., Giombini, M., Villagra, M., Cristiano, P., di Francescantonio, D., García, D., Trentini, C., Díaz Villa, V., Rodríguez, S., Medina, M., Ritter, L., Graciano, C., Crechi, E., Moretti, A. P., Olgún, F., Goldstein, G., & Fassola, H. (2021). Selva en Misiones. En P. L. Peri, G. Martínez Pastur, & T. Schlichter (Eds.), *Uso sostenible del bosque. Aportes desde la Silvicultura Argentina* (pp. 219–341). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/uso_sostenible_del_bosque_web.pdf
- Carvalho, P. E. R., (2003). *Espécies arbóreas brasileiras*. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa).
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P. M., Goodman, R. C., Henry, M., Martínez-Yrizar, A., Mugasha, W. A., Muller-Landau, H. C., Mencuccini, M., Nelson, B. W., Ngomanda, A., Nogueira, E. M., Ortiz-Malavassi, E., Pélissier, R., Ploton, P., Ryan, C. M., Saldarriaga, J. G., & Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177–3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Chaves, J. E., Aravena Acuña, M. C., Rodríguez-Souilla, J., Cellini, J. M., Rappa, N. J., Lencinas, M. V., Peri, L. P., & Martínez Pastur, G. J. (2023). Carbon pool dynamics after variable retention harvesting in *Nothofagus pumilio* forests of Tierra del Fuego. *Ecological Processes*, 12(1), 5. <https://doi.org/10.1186/s13717-023-00418-z>
- Chudnoff, M. (1980). *Tropical timbers of the world*. Forest Products Laboratory, Forest Service, USDA.
- Conti, G., Gorne, L. D., Zeballos, S. R., Lipoma, M. L., Gatica, G., Kowaljow, E., Whitworth-Hulse, J. I., Cuchiatti, A., Poca, M., Pestoni, S., & Fernandes, P. M. (2019). Developing allometric models to predict the individual aboveground biomass of shrubs



- worldwide. *Global Ecology and Biogeography*, 28(7), 961–975. <https://doi.org/10.1111/geb.12907>
- Cortés-Pérez, M., De León-González, F., Paz-Pellat, F., Leyva-Pablo, T., Santiago-García, W., Ponce-Mendoza, A., & Fuentes-Ponce, M. (2021). Almacenamiento de carbono aéreo en un bosque templado de Oaxaca: manejo de alta y baja intensidad. *Madera y Bosques*, 27(4), e2742440. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2742440>
- Détienne, P., Jacquet, P., & Mariaux, A. (1982). *Manuel d'Identification des Bois Tropicaux*. Editions Quae.
- Détienne, P., & Jacquet, P. (1983). *Atlas d'identification des bois de l'Amazonie et des regions voisines*. Nogent-Sur-Marne: Centre Technique Forestier Tropical.
- Di Rienzo J. A., Casanoves F., Balzarini M. G., Gonzalez L., Tablada M. & Robledo C. W. (2015). *InfoStat* (versión 2015) [Software]. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL: <http://www.infostat.com.ar>
- Dimitri, M. J., & Biloni, J. S. (1973). *Libro del árbol. Tomo 1. Esencias forestales indígenas de la Argentina de aplicación ornamental*. Celulosa Argentina; S.A.
- Esau, K. (1982). *Anatomía de las plantas con semilla*. Hemisferio Sur.
- Favrichon, V. (1994). Classification des espèces arborées en groupes fonctionnels en vue de la réalisation d'un modèle de dynamique de peuplement en forêt Guyanaise. *Revue d'Écologie (La Terre et La Vie)*, 49, 379–403.
- Fearnside, P. M. (1997). Wood density for estimating forest biomass in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management*, 90(1), 59-87. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(96\)03840-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(96)03840-6)
- Fengel, D., & Wegener, G. (1989). *Wood. chemistry, ultrastructure, reactions*. Walter de Gruyter.
- Fernández, M. E., Barotto, A. J., Martínez Meier, A., Gyenge, J. E., Tesón, N., Quiñones Martorello, A. S., Merlo, E., Dalla Salda, G., Rozenberg, P., & Monteoliva, S. (2019). New insights into wood anatomy and function relationships: How *Eucalyptus* challenges what we already know. *Forest Ecology and Management*, 454, 117638. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117638>
- Giménez, A. M., & Moglia, J. G. (2003). *Árboles del Chaco Argentino: Guía para el reconocimiento dendrológico*. Universidad Nacional de Santiago del Estero. <https://fcf.unse.edu.ar/index.php/portfolio/arboles-del-chaco-argentino/>
- Gutiérrez Rojas, V. H., & Silva Sandoval, J. (2000). *Información técnica para el procesamiento industrial de 134 especies maderables de Bolivia*. FAO: PAFBOL. <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/5378>
- Heerdt, S. T., & Ferreira de Melo, J. C. (2016). Anatomia sistemática e ecológica da madeira de seis espécies de *Nectandra* Rol. ex Rottb. (Lauraceae). *Baldwinia*, (54), 11-21. <http://dx.doi.org/10.5902/2358198022563>
- Holguín-Estrada, V. A., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O., Yerena-Yamalle, J. I., & Pequeño-Ledezma, M. Á. (2021). Estructura y composición florística de un bosque de galería en un gradiente altitudinal en el noroeste de México. *Madera y Bosques*, 27(2), e2722123. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722123>
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación [IRAM] (1985). *IRAM 9544. Método para la determinación de la densidad aparente*. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales.
- Keller, H. A., Pirono, A., & Stampella, P. (2022). Cosmología e historia del ricino y el amba'y entre los guaraníes del nordeste argentino. En N. I. Hilgert, P. C. Stampella, M. L. Pochettino, & J. E. Hernández Bermejo (Eds.), *Las misiones del noreste argentino* (p. 187). Editorial Universitaria, Universidad Nacional de Misiones.
- Lencinas, M. V., Huertas Herrera, A., Cellini, J. M., Barrera, M. D., Pérez Flores, M., Toro Manríquez, M. R., Benitez, J., & Martínez Pastur, G. J. (2024). Understory plant assemblage variations at different spatial scales: The case of *Nothofagus* forests in Tierra del Fuego. *Journal for Nature Conservation*, 77, 126534. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2023.126534>
- Leonardis, R. F. J. (1975). *Libro del árbol. Esencias forestales indígenas de la Argentina de aplicación industrial*. Tomo 2. Celulosa Argentina S.A.
- Leszczuk, A. A., Lorán, D., Martínez, M. E., Leizica, J. E., & Seppi, S. (2022). Estudio de los incendios ocurridos en la provincia de Misiones, Argentina, entre diciembre del año 2021 a marzo del año 2022. En M. Á. García y S. O. Ramos (Coords.), *Actas de las XXXVI Jornadas Forestales de Entre Ríos*.
- Little, E. L., & Wadsworth, F. H. (1964). *Common trees of Puerto Rico and the Virgin islands* (No. 249). US Department of Agriculture, Forest Service.
- Llovet Villamayor, R. (2023). *Análisis textural de imágenes satelitales como apoyo a la estimación de biomasa forestal con inventarios forestales* [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València].
- Lorenzi, H. (1992). *Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil*. Plantarum.
- Loureiro, A. A., & Lisboa, P. L. B. (1979). Madeiras do município de Aripuanã e suas utilidades (Mato Grosso). *Acta Amazonica*, 9, 5-88. <https://doi.org/10.1590/1809-43921979091s005>
- Maggio, A. D., & Cellini, J. M. (2016). *Recopilación de ecuaciones de volumen y biomasa de especies forestales de la República Argentina*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Presidencia de la Nación. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/54918>

- Manzanilla Quijada, G. E., Mata Balderas, J. M., Treviño Garza, E. J., Aguirre Calderón, Ó. A., Alanís Rodríguez, E., & Yerena Yamallel, J. I. (2020). Diversidad, estructura y composición florística de bosques templados del sur de Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(61), 94-123.
- Martins, R. (1944). *Livro das Arvores do Parana*. Gráfica Paranaense.
- Mayard, R., Segundinho, P. G. A., dos Santos, L. L., Gonçalves, F. G., & da Silva, J. G. M. (2022). Influência dos anéis de crescimento nas propriedades mecânicas da madeira de *Pinus*. *Madera y Bosques*, 28(3), e2832364. <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2832364>
- Medeiros, D. T., Melo, R. R., Cademartori, P. H. G., Batista, F. G., & Mascarenhas, A. R. P. (2021). Caracterização da madeira de espécies da Amazônia. *Madera y Bosques*, 27(2), e2722209. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722209>
- Medina, M. (2020). *Patrones de regeneración de árboles nativos en plantaciones de Araucaria angustifolia (Bertol.) Kuntze* de noreste de Misiones [Tesis doctoral, Universidad Nacional de La Plata]. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/119668>
- Medina, M., Ritter, L. J., Campanello, P. I., & Arturi, M. F. (2019). Relación entre estrategias de historia de vida y atributos funcionales en especies arbóreas del Bosque Atlántico semideciduo de Misiones. *Ecología Austral*, 29(3), 380-390. <https://doi.org/10.25260/EA.19.29.3.0.827>
- Miles, P. D., & Smith, W. B. (2009). *Specific gravity and other properties of wood and bark for 156 tree species found in North America*. Research Note NRS-38. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station <https://doi.org/10.2737/NRS-RN-38>
- Miranda, I., & Pereira, H. (2016). Variation of wood and bark density and production in coppiced *Eucalyptus globulus* trees in a second rotation. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 9, 270-275. <https://doi.org/10.3832/ifor1442-008>
- Moya, R., Wiemann, M. C., & Olivares, C. (2013). Identification of endangered or threatened Costa Rican tree species by wood anatomy and fluorescence activity. *Revista de Biología Tropical*, 61(3), 1113-1156.
- Murtagh, F., & Legendre, P. (2014). Ward's hierarchical agglomerative clustering method: which algorithms implement Ward's criterion?. *Journal of Classification*, 31, 274-295. <https://doi.org/10.1007/s00357-014-9161-z>
- Neumann, M., Eastaugh, C. S., & Adams, M. A. (2020). Managing mixed *Callitris-Eucalyptus* forests for carbon and energy in central-eastern Australia. *Biomass and Bioenergy*, 140, 105656. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105656>
- Neumann, M., & Lawes, M. J. (2021). Quantifying carbon in tree bark: The importance of bark morphology and tree size. *Methods in Ecology and Evolution*, 12(4), 646-654. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13546>
- Oficina Española de Cambio Climático [OECC] (2019). *Guía para la estimación de absorciones de dióxido de carbono*. Gobierno de España, Ministerio para la Transición Ecológica. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/guiapa_tcm30-479094.pdf
- Pereyra, O., & Gelid, M. (2002). Estudio de la variabilidad de la densidad básica de la madera de *Pinus taeda* para plantaciones de misiones y norte de corrientes. *Revista Floresta*, 33(1), 3-19.
- Quintanar-Isaías, A., Jacobo-Villa, M. A., López-Binnqüist, C., Flores-Hernández, N., Jaramillo-Pérez, A. T., & de la Paz-Pérez-Olvera, C. (2012). La madera de *Trema micrantha* (L.) Blume de Veracruz, México. *Madera y Bosques*, 18(2), 73-91. <https://doi.org/10.21829/myb.2012.182353>
- Reutemann, G. C. (2015). *Implantación de un yerbal con manejo agroforestal (agroecológico)*. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/52411>
- Richter, H. G., & Dallwitz, M. J. (2000). *Commercial timbers: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval*. Delta. <https://www.delta-intkey.com/wood/en/www/tilludiv.htm>
- Riesco Muñoz, G., Imaña Encinas, J., & Elías de Paula, J. (2019). Densidad de la madera de 59 especies del orden Sapindales procedentes de bosques naturales brasileños. *Madera y Bosques*, 25(2), e2521817. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521817>
- Ritter, L. J. (2017). *Regeneración de árboles nativos en plantaciones de Pinus taeda L. en el norte de Misiones: efectos del manejo a nivel del rodal y el paisaje*. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional de La Plata].
- Rodríguez, S. A. (2015). *Propiedades biomecánicas y ecofisiológicas de especies de árboles nativos y cultivados en la provincia de Misiones*. [Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires]. http://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis_n5778_Rodriguez
- Sinan, M., Neumann, M., & Hasenauer, H. (2024). How much carbon is stored in the stem bark of Austrian trees?. *Carbon Management*, 15(1), 2363747. <https://doi.org/10.1080/17583004.2024.2363747>
- Suzuki, E. 1999. Diversity in specific gravity and water content of wood among Bornean tropical rainforest trees. *Ecological Research*, 14, 211-224.
- ter Steege, H., & Hammond, D. S. (2001). Character convergence, diversity, and disturbance in tropical rain forest in Guyana. *Ecology*, 82(11), 3197-3212. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2001\)082\[3197:CCDADI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2001)082[3197:CCDADI]2.0.CO;2)



- Tortorelli, L. A. (1956). *Maderas y bosques argentinos*. Orientación Gráfica Editora.
- Trautenmüller, J. W., Balbinot, R., Valerius, J., Borella, J., Trevisan, R., Gonzatto, G. L., & Medeiros Ribeiro, R. (2015). Axial variation in wood basic density of *Trichilia clausenii* and *Calyptrocalyx tricona*. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 9(31), 178-181.
- United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC] (2013). *Estimation of carbon stocks and change in carbon stocks of trees and shrubs in A/R CDM Project activities*. <http://cdm.unfccc.int/methodologies/ARmethodologies/tools/ar-am-tool-14-v4.1.pdf>
- Vaccaro, S., Arturi, M. F., Goya, J. F., Frangi, J. L., & Piccolo, G. (2003). Almacenaje de carbono en estadios de la sucesión secundaria en la provincia de Misiones, Argentina. *Interciencia*, 28(9), 521-527.
- Van Gelder, H. A., Poorter, L., & Sterck, F. (2006). Wood mechanics, allometry, and life-history variation in a tropical rain forest tree community. *New Phytologist*, 171(2), 367-378. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01757.x>
- Velázquez-Pérez, C., Tovilla-Hernández, C., Romero-Bermy, E. I., & Jesús-Navarrete, A. D. (2019). Estructura del manglar y su influencia en el almacén de carbono en la Reserva La Encrucijada, Chiapas, México. *Madera y Bosques*, 25(3), e2531885. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2531885>
- Wang, Y., Zhang, R., & Zhou, Z. (2021). Radial variation of wood anatomical properties determines the demarcation of juvenile-mature wood in *Schima superba*. *Forests*, 12(4), 512. <https://doi.org/10.3390/f12040512>
- Wiemann, M. C., & Williamson, G. B. (1989). Wood specific gravity gradients in tropical dry and montane rain forest trees. *American Journal of Botany*, 76(6), 924-928. <https://doi.org/10.2307/2444548>
- Zang, L., & Haugg, D. (2023). Transformaciones en la estructura agraria de Misiones (Argentina): Análisis en perspectiva histórica-ambiental. *Revista Chakiñan de Ciencias Sociales y Humanidades*, (20), 125-141. <https://doi.org/10.37135/chk.002.20.07>
- Zerecero-Salazar, B. C., Salcedo-Pérez, E., Gallegos-Rodríguez, A., Olvera-Vargas, M., & Ángeles-Pérez, G. (2024). Curvas de crecimiento por estratos de dominancia en bosques al sureste de Jalisco, México. *BOSQUE*, 45(1), 79-90. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002024000100079>

Manuscrito recibido el 13 de noviembre de 2023

Aceptado el 06 de marzo de 2025

Publicado el 13 de junio de 2025

Este documento se debe citar como:

Arcidiácono, R. L., Taraborelli, C., Ritter, L., Martínez Pastur G., & Cellini, J. M. (2025). Variaciones de la densidad de la madera: implicaciones en el cálculo del carbono almacenado en capueras de Misiones, Argentina. *Madera y Bosques*, 31, e312650. <https://doi.org/10.21829/myb.2025.312650>



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercialCompartirIgual 4.0 Internacional.