

Almacenamiento de carbono y dióxido de carbono en una plantación de Eucalyptus spp. en la Facultad de Ciencias Agrarias en el Campus de San Lorenzo

Carbon and carbon dioxide storage in a Eucalyptus spp. plantation at the Faculty of Agricultural Sciences on the San Lorenzo Campus

Maura Isabel Díaz Lezcano¹ ; Jimmy Rasche¹ ; Pablo Godoy¹ ; Oscar Colmán¹ ;
Mónica González¹ ; Rubén Pérez¹ ; Gustavo Ayala¹ ; Estefanía Godoy¹ .

RESUMEN

Las plantaciones forestales y agroforestales capturan carbono y lo almacenan principalmente en la biomasa dura (madera), hojas, ramas, corteza y raíces; esto depende de la composición de las especies en un bosque o plantación, del efecto de factores climáticos locales. El objetivo de esta investigación fue determinar el almacenamiento de carbono y dióxido de carbono en una plantación de Eucalyptus spp. en el campo experimental de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción (FCA UNA). Se estableció una parcela de 10,200 m² para analizar variables dasométricas, estimar biomasa arbórea y herbácea, y determinar el carbono en la vegetación y el suelo. El estudio de la plantación de Eucalyptus spp., evidenció un predominio de la biomasa arbórea frente a la herbácea, lo que resalta el importante papel de los árboles en la acumulación de biomasa dentro del sistema. Esto sugiere que los componentes arbóreos son fundamentales para maximizar el almacenamiento de carbono y la productividad sostenible en estos sistemas. La plantación de Eucalyptus spp. del campo experimental de la FCA UNA ubicado en el Distrito de San Lorenzo almacenó 140.7 t ha⁻¹ y, 515.9 t ha⁻¹ de carbono y dióxido de carbono, respectivamente. Estos resultados resaltan el potencial del manejo de Eucalyptus spp. para la producción sostenible y el almacenamiento de biomasa y carbono. A modo de conclusión, la plantación de Eucalyptus spp. del campo experimental de la FCA UNA constituye un reservorio de carbono en el Distrito de San Lorenzo contribuyendo a mitigar las acciones de los gases de efecto invernadero.

Palabras claves: biomasa, plantaciones forestales, variables dasométricas, vegetación, suelo.

Fecha de recepción: octubre 2025 Aceptado: marzo 2026

¹ Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay

Autor de Correspondencia: Maura Isabel Díaz Lezcano: Email: maura.diaz@agr.una.py



Este es un artículo publicado en acceso abierto bajo una Licencia Creative Commons.

ABSTRACT

Forest and agroforestry plantations capture carbon and store it primarily in hard biomass (wood), leaves, branches, bark, and roots; this depends on the species composition of a forest or plantation and the effect of local climatic factors. The objective was to determine carbon and carbon dioxide storage in a *Eucalyptus* spp. plantation on the Campus of the Faculty of Agricultural Sciences of the National University of Asunción (FCA UNA). A 10,200 m² plot was established to analyze dasometrics variables, estimate tree and herbaceous biomass, and measure carbon in vegetation and soil. The study of the *Eucalyptus* spp. plantation showed a predominance of tree biomass over herbaceous biomass, highlighting the important role of trees in biomass accumulation within the system. This suggests that tree components are critical to maximizing carbon storage and sustainable productivity in these systems. These results highlight the potential of managing *Eucalyptus* spp. for sustainable production and storage of biomass and carbon. In conclusion, the *Eucalyptus* spp. plantation of the FCA UNA experimental field constitutes a carbon reservoir in the San Lorenzo District, contributing to mitigating the effects of greenhouse gases.

Keywords: biomass, forest plantations, dasometrics variables, vegetation, soil.

INTRODUCCIÓN

Las plantaciones forestales y agroforestales capturan carbono y lo almacenan principalmente en la biomasa dura (madera), hojas, ramas, corteza y raíces; esto depende de la composición de las especies en un bosque o plantación, del efecto de factores climáticos locales como precipitación y temperatura, de las características del suelo que determinan el crecimiento del árbol (Somarriba et al., 2013), de la edad y de la fauna acompañante. Además, la capacidad de capturar carbono atmosférico tiende a disminuir en relación al incremento de la edad del bosque o al grado de madurez del suelo, en edades tempranas o intermedias es más alta la captura de carbono (Fonseca, Rey-Benayas y Alice, 2011; Ajit et al., 2013).

La pérdida o la acumulación de carbono en el suelo depende de una ecuación que consiste en la fijación o secuestro de carbono (C) que se da inicialmente por la extracción de CO₂ desde la atmósfera a través de la fotosíntesis transfiriendo C de la atmósfera a la planta y de esta al suelo por medio de los residuos vegetales (Kane, 2020), la fracción de carbono que quedará secuestrada en el suelo, depende de las características de la fracción orgánica de la planta y de la capacidad de cada tipo de suelo para fijar carbono de acuerdo a sus propiedades físicas y químicas, así como la interacción entre los factores abióticos y bióticos (Lal et al., 2015), siendo esta tasa de estabilización del carbono orgánico del suelo (COS) a medio y largo plazo, lo que da lugar a un tiempo medio de residencia más o menos estable de COS (Chenu et al., 2019).

El suelo destinado a la plantación forestal es el medio donde se establece, crece y produce el material vegetal. Además, proporciona agua y nutrientes esenciales durante su desarrollo (Harrison, 2001).

Este sistema está compuesto por horizontes formados a partir de procesos pedogénéticos, lo que lo convierte en una mezcla compleja de minerales, materia orgánica, microorganismos, aire y agua. Comprender estos componentes y horizontes resulta fundamental para identificar tanto las potencialidades como las limitaciones del suelo en el ámbito forestal (Zapata, 2006). La disponibilidad de nutrientes en el suelo es esencial para el desarrollo adecuado de los árboles, ya que sus necesidades deben ser cubiertas para garantizar un crecimiento normal. La falta de acceso suficiente a estos nutrientes puede provocar deficiencias que afecten negativamente su desarrollo general (Aristizábal, 2003).

Este tipo de investigación permite evaluar el potencial de estas plantaciones en la estimación de biomasa, así como también en la captura y almacenamiento de carbono, lo que contribuye a mitigar los efectos del cambio climático. El objetivo de esta investigación fue determinar el almacenamiento de carbono y dióxido de carbono en la parte aérea y en el suelo de una plantación de *Eucalyptus* spp. en el campo experimental de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción.

MÉTODO

El estudio se realizó en una parcela de ensayo silvopastoril con *Eucalyptus* spp. en el Campus Universitario de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción (FCA UNA), San Lorenzo, distante a unos 11 km de la Capital, con coordenadas de referencia: latitud 25°19'45.36" S y longitud 57°31'09.24" O. El censo forestal, las mediciones del componente herbáceo y la recolección de muestras de suelos fueron realizadas durante los meses de mayo, junio y julio del año 2023.

Las actividades llevadas a cabo contaron con el financiamiento de los fondos de incentivo a la investigación de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción, Convocatoria 2023.

Según Hiber (2000), la preparación de la parcela de *Eucalyptus* spp., incluyó el arado, la nivelación con rastra, fertilización en hoyos y riego suplementario. La plantación se realizó en octubre de 1991 con replantaciones ese mismo año, contando actualmente con 34 años. La densidad inicial de plantación fue de 3 x 3 metros.

Se estableció una parcela de 10,200 m² para analizar variables dasométricas, estimar biomasa y carbono en los estratos arbóreo y herbáceo, y determinar el carbono orgánico del suelo. En la Tabla 1 se detallan las variables y ecuaciones aplicadas.

Biomasa arbórea: Se midió el diámetro a la altura del pecho (DAP) y las alturas total y comercial de cada árbol, con forcípulas y varas altimétricas, respectivamente.

Vegetación herbácea: Se evaluaron la altura, peso fresco y peso seco de las plantas, con la utilización de cintas métricas y básculas manuales, respectivamente.

Suelo: Se determinaron las propiedades físicas (densidad aparente, textura, pedregosidad y color) y las químicas (pH, materia orgánica y macronutrientes), mediante análisis de suelo en laboratorio.

Se realizó un censo forestal para registrar todos los árboles en el área de estudio, identificándose a través de claves taxonómicas. Durante este proceso, se midió el diámetro a la altura del pecho (DAP) de los árboles, así como su altura total y comercial.

Para la determinación de las variables de la vegetación herbácea, se extrajeron muestras de pasturas con el bastidor de 1 m², en puntos representativos. Se realizó la identificación botánica de las muestras, considerando claves taxonómicas, posteriormente fueron pesadas para determinar la biomasa fresca, y finalmente fueron secadas a 65 °C estufa hasta alcanzar peso constante en el Laboratorio de Bromatología de la FCA UNA, para determinar la biomasa seca.

Tabla 1: Fórmulas para medición de variables dasométricas

Variables	Fórmulas
Área Basal	$G = \pi * DAP^2 / 4$
Volumen Total	$V = g \times H \times ff$
Biomasa Total	$BT = 1,22 \times D^2 \times DH^{0,01}$
Carbono Total	$CT = BT \times 0,5$
Dióxido de carbono equivalente	$CO_{2eq} = CT * 3,667$
IMA	$IMA = Vt / \text{años}$

Donde:

- G = Área basal en (m^2)
- $\pi = 3,1416$
- DAP = Diámetro a la altura del pecho (cm)
- V = volumen. ($m^3 \cdot ha^{-1}$)
- H = Altura comercial o total (m)
- ff = factor de forma para Eucalyptus spp. 0,46 (Japan International Research Center for Agricultural Sciences, 2012).
- BT = Biomasa Total ($t \cdot ha^{-1}$).
- D = Diámetro a los 1,30 m.
- BT = Biomasa total $\times 0,5$ (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006).
- CO_{2eq} = Dióxido de carbono equivalente
- CT = Carbono total

En cuanto al estudio de las variables de suelo, se tomaron 4 muestras compuestas, cada una formada por 2 muestras simples en tres profundidades: 0 - 10 cm, 10 - 20 cm y 20 - 30 cm., ubicadas en puntos representativos. Para determinar la densidad aparente se aplicó el método del cilindro de acero biselado con 2 repeticiones por profundidad en los mismos puntos de las muestras químicas. La determinación de la textura se realizó mediante el análisis gra-

nulométrico mediante el método de Bouyoucos y la determinación del color gracias a interpretación de la tabla de Munsell.

Para la determinación del carbono orgánico del suelo se procedió al análisis laboratorio de las muestras extraídas, mediante el método de Walkley y Black.

Para la determinación de la materia orgánica y el dióxido de carbono equivalente se aplicaron las siguientes fórmulas

$$MOS = CO * 1.72$$

$$CO_{2eq} = CO * 3.667$$

Donde,

- MOS = Materia orgánica del suelo
- CO = Carbono orgánico
- CO_{2eq} = Dióxido de carbono equivalente

Una vez determinadas las cantidades de carbono y dióxido de almacenadas en cada depósito; forestal, herbáceo y suelo, se procedió a la sumatoria para estimar el contenido total.

Todos los datos colectados fueron cargados en planillas de Excel para su posterior análisis estadístico. Se aplicó estadística descriptiva y para mejor interpretación los resultados fueron expresados en tablas y gráficos.

RESULTADOS

Componente forestal y herbáceo

Se identificaron 10 especies de eucaliptos, estas especies pertenecen a de la familia Myrtaceae. Actualmente la especie *Eucalyptus citriodora* recibe el nombre científico de *Corimbia citriodora*. En la Tabla 2 se presentan las especies registras mediante el censo el DAP varió entre 30 a

56 cm con un promedio de 37.4 cm, la altura total entre 10 a 14 m con un promedio de 11.24 m y la altura comercial entre 8 a 10 m con promedio de 8.8 m, registrándose 213 individuos en total.

Tabla 2: Composición florística forestal del área de estudio

Nº	Especie	Nombre Común
1	<i>Eucalyptus camaldulensis</i> Dehnh. Var. <i>Camaldulensis</i>	Eucalipto rojo
2	<i>Corimbia citriodora</i> (<i>Eucalyptus citriodora</i> Hook f.)	Eucalipto aromático
3	<i>Eucalyptus dunnii</i> Maid.	Eucalipto
4	<i>Eucalyptus microcorys</i> F. Muell.	Eucalipto
5	<i>Eucalyptus paniculata</i> Sm.	Eucalipto
6	<i>Eucalyptus robusta</i> Sm. (sin. <i>E. multiflora</i> Poir)	Eucalipto
7	<i>Eucalyptus saligna</i> Sm.	Eucalipto
8	<i>Eucalyptus tereticornis</i> Sm	Eucalipto
9	<i>Eucalyptus urophylla</i> S. T. Blake	Eucalipto
10	<i>Eucalyptus cloeziana</i> F. Muell.	Eucalipto

Se halló un área basal de 29.65 m².ha⁻¹ con un promedio de 0.139 m².ha⁻¹ por individuo, los valores de DAP promedio fueron de 38 cm, y un volumen total de 473.05 m³.ha⁻¹. El IMA calculado fue de 14.33 m³.ha⁻¹.año⁻¹.

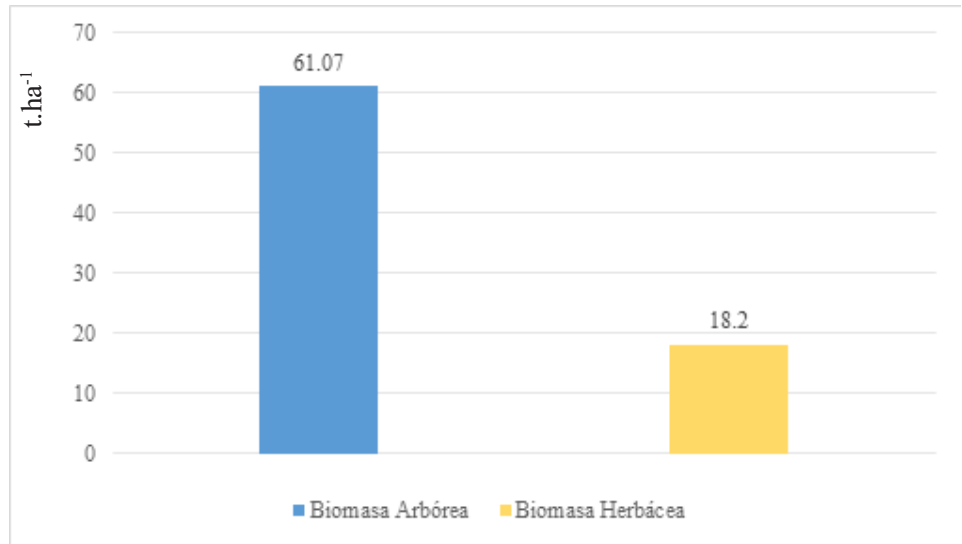
Se estimó una biomasa arbórea total de 61.07 t.ha⁻¹, con un almacenamiento total de carbono de 30.54 tC.ha⁻¹ y un equivalente de dióxido de carbono de 111.98 CO_{2eq}.ha⁻¹.

El componente herbáceo estaba constituido por *Brachiaria brizantha* cv. Marandú, con una altura promedio de 1.01 m. El peso fresco fue de 6.18 kg (MV).m⁻² y

el peso seco fue de 1.82 kg (MS).m⁻² Se obtuvo una biomasa de 18.2 t (MS).ha⁻¹, mientras que el carbono almacenado en pastura fue de 9.1 tC.ha⁻¹. El dióxido de carbono equivalente en el sistema fue de 33.39 CO_{2eq}.ha⁻¹.

La biomasa total estimada en el sistema fue de 79.27 t.ha⁻¹, distribuyéndose entre biomasa arbórea y herbácea. En la figura 1 se puede observar que la biomasa arbórea representa la mayor parte, con un valor de 61.07 t.ha⁻¹ y por otro lado la biomasa herbácea, con un valor de 18.2 t.ha⁻¹.

Figura 1: Distribución de la biomasa arbórea y herbácea en la plantación de Eucalyptus spp. en campo experimental de la FCA - UNA



Componente suelo

El suelo presentó una densidad de entre 1388 a 1587 kg m-3 textura arenosa y areno franco a franco arenosa, con un color marrón a marrón rojizo, tal como se observa en la Tabla 3

Tabla 3: Valores de densidad aparente textura y color del suelo de la plantación de Eucalyptus spp. FCA - UNA

Profundidad (cm)	Densidad (kg.m-3)	Clasificación textural	Color
0 – 10	1388	Arenosa	Marrón
10 – 20	1587	Areno franco	Marrón rojizo
20 – 30	1390	Franco arenosa	Marrón rojizo

Se observa que la densidad del suelo es mayor a partir de los 10 cm de profundidad, siendo la densidad mayor a lo que se esperaba. Esta alta densidad del suelo (mayor a 1350 kg.m-3) se debe a que estos suelos por décadas fueron de uso agrícola, con arada y rastrada del suelo, por lo que estos suelos tuvieron su materia orgánica diezmada por esa práctica agrícola y junto con ella los problemas de compactación del suelo, con la reforestación los suelos

vuelven a acumular materia orgánica, pero es un proceso lento que tarda décadas para volver a su estado original. En los resultados del análisis químico del suelo se observó disminución del pH del suelo a mayor profundidad, lo cual puede estar relacionado con el manejo del sistema o con la composición de los residuos orgánicos aportados por los árboles. Al mismo tiempo, se evidenció una disminución progresiva en el contenido

de materia orgánica, fósforo disponible, potasio, calcio y magnesio conforme aumenta la profundidad del suelo. Este comportamiento sugiere que los nutrientes se concentran principalmente en las capas superficiales, donde se acumulan los res-

tos orgánicos y ocurre la mayor actividad biológica, mientras que las capas más profundas muestran menor influencia de estos procesos. Los valores del análisis se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4: *Análisis de propiedades químicas del suelo de la plantación de Eucalyptus spp. FCA – UNA*

Prof. (cm)	pH	MOS (%)	P (mg.kg-1)	K+ (cmolc.kg-1)	Ca+2 (cmolc.kg-1)	Mg+2 (cmolc.kg-1)
0 – 10	6.20	1.64	1.97	0.04	0.99	0.32
10 – 20	5.80	1.24	1.18	0.04	0.40	0.23
20 – 30	5.30	0.78	0.89	0.03	0.20	0.23

Tabla 5: *Nivel de materia orgánica (MO), carbono orgánico (CO), densidad aparente del suelo y carbono orgánico y CO₂eq de cada camada de suelo hasta los 30 cm de profundidad*

Profundidad	MO	C	Densidad aparente	CO	CO _{2eq}
cm	%	%	Kg.m-3	t.ha ⁻¹	t.ha ⁻¹
0 -10	1.64	0,95	1388	13.193	48.378
10 – 20	1.24	0,72	1587	11.422	41.884
20 – 30	0.78	0,45	1390	6.297	21.006
Total (0-30 cm)				30.913	111.268

En las tres profundidades, tanto la materia orgánica como el carbono orgánico es superior en la camada de 0 a 10 cm y disminuyen en las camadas subsuperficiales, eso es de esperarse considerando que en cultivos forestales y bosques las hojas que caen de las plantas se acumulan con el tiempo sobre el suelo aumentando en nivel de C en la camada superficial.

Carbono y dióxido de carbono almacenado en la plantación

La plantación de *Eucalyptus* spp. del campo experimental de la FCA UNA ubicado en el Distrito de San Lorenzo almacenó en total 140.7 t ha⁻¹ y, 515.9 t ha⁻¹ de carbono y dióxido de carbono, respectivamente.

DISCUSIÓN

Gauna (2015) realizó un estudio de las variables dasométricas en la misma plantación de *Eucalyptus* spp. en cual muestra que presenta una menor densidad de árboles, lo que podría deberse a la competencia y mortalidad natural con el tiempo. Sin embargo, el área basal es ligeramente mayor ($29.65 \text{ m}^2.\text{ha}^{-1}$) en comparación al calculado en el presente estudio. En cuanto al DAP no hubo diferencias, lo cual indica un crecimiento individual mayor de los árboles en la plantación, posiblemente como resultado de la reducción en la densidad y del mayor tiempo de crecimiento. En la misma parcela constituida por *Eucalyptus* spp. halló una biomasa arbórea total de $165 \text{ t}.\text{ha}^{-1}$, el carbono total almacenado fue de $82,5 \text{ tC}.\text{ha}^{-1}$, valores superiores a los hallados en el presente estudio. Es posible que la densidad de la plantación haya influido en los resultados. Por otro lado, Eitzen (2022) quien evaluó plantaciones de *Eucalyptus* spp. en el Departamento de San Pedro de Paraguay estimó una biomasa total significativamente superior a la observada en la parcela, con $230.58 \text{ t}.\text{ha}^{-1}$, mientras que Santacruz (2021) reportó un valor ligeramente inferior, de $96.77 \text{ t}.\text{ha}^{-1}$ en la misma localidad.

Eitzen (2022), quien estudió suelos bajo plantaciones de *Eucalyptus* spp. referidas, registró valores promedios de densidad de $1418.81 \text{ kg}.\text{m}^{-3}$ a una profundidad de 0 - 10 cm, valor superior a lo registrado en esta investigación y $1225.73 \text{ kg}.\text{m}^{-3}$ de 10 - 30 cm, valor inferior a lo reportado en los suelos analizados en este estudio. En la misma localidad, Arzamendia (2019) en investigaciones llevada a cabo en el Departamento de San Pedro, determinó que los valores de pH obtenidos en su investigación fueron similares a los reportados en el presente estudio, mencionando que

fueron de 6.05 a una profundidad de 0 - 10 cm y de 5.72 en el rango de 10 - 30 cm, sin embargo el almacenamiento de carbono orgánico de 0-30 cm de profundidad de suelos fue $86.4 \text{ t}.\text{ha}^{-1}$, valor muy por debajo al reportado en esta investigación.

Resultados similares a los de la presente investigación fueron reportados por Marcelo Bazán *et al.* (2023) afirmando que existe un total de $127.64 \text{ t}.\text{ha}^{-1}$ de biomasa en todo el sistema silvopastoril constituido por *Eucalyptus viminalis* Labill asociadas con dos especies forrajeras de la familia Poaceae. El carbono capturado en el sistema estuvo mayoritariamente en el suelo, con $91.35 \text{ t}.\text{ha}^{-1}$ (58.9 %), seguido de carbono arbóreo con $56.79 \text{ t}.\text{ha}^{-1}$ (36.6 %), hojarasca con $4.36 \text{ t}.\text{ha}^{-1}$ (2.8 %) y, en menor proporción, el herbáceo con $2.67 \text{ t}.\text{ha}^{-1}$ (1.7%). El carbono y CO_2eq capturados en todo el sistema fueron 155.20 y $569.58 \text{ t}.\text{ha}^{-1}$.

Por su parte, Du *et al.* (2015) afirman que los patrones de asignación de carbono (C) a lo largo de las diferentes etapas del desarrollo de las plantaciones de *Eucalyptus urophylla* $\times$ *E. grandis* no se comprenden bien. En su estudio, examinaron la biomasa y el contenido de C del suelo mineral en cinco etapas de desarrollo (1, 2, 3, 4-5 y 6-8 años) de una masa de eucalipto en el sur de China. El depósito de C de la biomasa de los árboles aumentó con la edad de la masa y mostró una alta tasa anual de acumulación. Los tallos representaron la mayor proporción de C de la biomasa secuestrado. El depósito de C en el suelo mineral aumentó inicialmente después de la forestación y luego disminuyó gradualmente, con la densidad de C disminuyendo con la profundidad del suelo. Los 50 cm superiores del suelo contenían la mayoría (57%–68%) del C secuestrado. Los otros

componentes de la biomasa (arbustos, plantas herbáceas, hojarasca y raíces finas) representaron <5% del depósito total de C del ecosistema. Los depósitos totales de C en el ecosistema de plantaciones de *eucalipto* fueron de 112.9, 172.5, 203.8, 161.1 y 162,7 t.ha⁻¹ en las cinco etapas de desarrollo, respectivamente, con la mayor parte del C secuestrado bajo tierra. Concluyeron que las plantaciones de *eucalipto* tienen un potencial considerable de secuestro de C en la biomasa durante el desarrollo de la masa.

Asimismo, Chen *et al.* (2013) refieren que la biomasa de los árboles constituye una parte importante del depósito de Car-

bono en la biomasa y aumenta rápidamente con la edad de la plantación, tanto en las fracciones por encima como por debajo del suelo de manera similar a las tendencias observadas en otros tipos de bosques.

Las estimaciones reportadas en la presente investigación son similares a los valores obtenidos tanto por Álvarez *et al.* (2005) como por Cárdenas (2016), quienes mencionan almacenamiento de carbono entre 71 y 213 t.ha⁻¹ para *E. globulus* en macizos de 13 y 24 años en España y de 15 años en Perú, respectivamente.

CONCLUSIONES

El estudio de la plantación de *Eucalyptus* spp., evidenció un diámetro promedio a la altura del pecho que refleja el buen desarrollo de los árboles. Asimismo, se observó un volumen total considerable y un índice de incremento medio anual que confirma el crecimiento eficiente de la plantación, considerando que la plantación tiene más de 30 años de edad. También demuestra un predominio de la biomasa arbórea frente a la herbácea, lo que resalta el importante papel de los árboles en la acumulación de biomasa dentro del sistema. Esto sugiere que los componentes arbóreos son fundamentales para maximizar el almacenamiento de carbono y la productividad sostenible en estos sistemas. Estos resultados resaltan el potencial del manejo de *Eucalyptus* spp. para la producción sostenible y el almacenamiento de biomasa. El análisis del carbono almacenado en el suelo mostró una distribución decreciente con la profundidad, reflejando mayores

concentraciones en las capas superficiales. Esto resalta la importancia del manejo adecuado las plantaciones para optimizar tanto la fertilidad del suelo como el almacenamiento de carbono, contribuyendo así a la mitigación de los gases de efecto invernadero y al mantenimiento de la productividad del sistema.

REFERENCIAS

- Álvarez, J. G., Balboa, M. A., Merino, A., & Rodríguez, R. (2005). Estimación de la biomasa arbórea de *Eucalyptus globulus* y *Pinus pinaster* en Galicia. *Recursos Rurais*, 1(1), 21–30. <https://doi.org/10.15304/rr.id5337>
- Aristizabal, M. (2003). Fisiología vegetal en Colombia (Vol. 1). Artes Gráficas Tizán.
- Ajit, D., Dhyan, S. K., Ramnewaj, Handa, A. K., Prasad, R., Alam, B., Rizvi, R. H., Gupta, G., Pandey, K. K., Jain, A., & Uma. (2013). Modeling analysis of potential carbon sequestration under existing agroforestry systems in three districts of Indo-Gangetic plains in India. *Agroforestry Systems*, 87(5), 1129–1146. <https://doi.org/10.1007/s10457-013-9625-x>
- Arzamendia, F. A. (2019). Análisis de las propiedades físicas y químicas del suelo en una parcela bajo sistema silvopastoril en la Colonia Volendam [Tesis de grado, Universidad Nacional de Asunción].
- Cárdenas, R. C. (2016). Evaluación del potencial de los bosques de *Eucalyptus globulus* y *Pinus radiata* como sumideros de carbono en el entorno del Parque Nacional Huascarán (Perú) [Tesis doctoral, Universidad de Salamanca]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=79290>
- Chen, G. S., Yang, Z. J., Gao, R., Xie, J. S., Guo, J. F., Huang, Z. Q., & Yang, Y. S. (2013). Carbon storage in a chronosequence of Chinese fir plantations in southern China. *Forest Ecology and Management*, 300, 68–76.
- Chenu, C., Angers, D. A., Barré, P., Derrien, D., Arrouays, D., & Balesdent, J. (2019). Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations. *Soil and Tillage Research*, 188, 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.04.011>
- Du, H., Zeng, F., Peng, W., Wang, K., Zhang, H., Liu, L., & Song, T. (2015). Almacenamiento de carbono en la cronosecuencia de una plantación de eucaliptos en el sur de China. *Forests*, 6(6), 1763–1778. <https://doi.org/10.3390/f6061763>
- Eitzen, S. (2022). Producción de biomasa en tres sistemas silvopastoriles de la Colonia Volendam, San Pedro [Tesis de grado, Universidad Nacional de Asunción].
- Fonseca, W., Rey-Benayas, J. M., & Alice, F. E. (2011). Carbon accumulation in the biomass and soil of different aged secondary forests in the humid tropics of Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 262(8), 1400–1408. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.06.036>
- Gauna, M. (2015). Almacenamiento de carbono en una plantación de *Eucalyptus* spp. y en una nativa mixta en San Lorenzo, Paraguay [Tesis de grado, Universidad Nacional de Asunción].
- Harrison, L. (2001). Fertilidad de suelos: Un artículo fundamental. *Permacultura México*.
- Hieber, C. (2000). Comportamiento de 10 especies de *Eucalyptus* en diferentes condiciones de sitio [Tesis de grado, Universidad Nacional de Asunción].
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero: Volumen 4. Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra. IGES. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol4.html>
- Japan International Research Center for

- Agricultural Sciences. (2012). Reforestación en tierras de cultivos y praderas en comunidades de bajos ingresos del departamento de Paraguari, Paraguay. FCA-UNA.
- Kane, D., Bradford, M., Fuller, E., Oldfield, E., Wood, S., & KNB. (2020). Mean maize yield, soil characteristics, and drought metrics for US maize growing counties, 2000–2016.
- Lal, R. (2015). Sustainable intensification for adaptation and mitigation of climate change and advancement of food security in Africa. En R. Lal et al. (Eds.), *Sustainable intensification to advance food security and enhance climate resilience in Africa* (pp. 3–17). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09360-4_1
- Marcelo-Bazán, F. E., Mantilla-Chávez, W., Baselly-Villanueva, J. R., Vargas-Al-dave, J. C., & Pajares-Gallardo, U. (2023). Uso potencial de *Eucalyptus viminalis* Labill. para la captura de carbono en un sistema silvopastoril, Perú. *Colombia Forestal*, 26 (1), 64–78.
- Santacruz, D. J. (2021). Estimación dasométrica de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* y contenido de carbono en un sistema silvopastoril en la Colonia Volendam [Tesis de grado, Universidad Nacional de Asunción].
- Somarriba, E., Cerda, R., Orozco, L., Cifuentes, M., Dávila, H., Espín, T., ... & Deheuvels, O. (2013). Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 173, 46–57. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.04.013>
- Zapata, R. (2006). Química de los procesos pedogenéticos (pp. 31–44).