

SUMIDEROS NATURALES DE CARBONO: UN ESTUDIO DE CASO EN MORICHALES DE LA ALTILLANURA COLOMBIANA



NATURAL CARBON SINKS: A CASE STUDY OF MORICHE PALMS IN THE COLOMBIAN SAVANNA

Orozco-Hueje, Daniela; Barreto-Rojas, Diana Milena; Trujillo-González, Juan Manuel; Silva-Parra, Amanda; Serrano-Gómez, Marlon; Castillo-Monroy, Edgar Fernando; Torres-Mora, Marco Aurelio

Daniela Orozco-Hueje

daniela.orozco@unillanos.edu.co

Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad de los Llanos, Campus Barcelona, Villavicencio, Colombia, Colombia

Diana Milena Barreto-Rojas

dmbarreto@unillanos.edu.co

Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad de los Llanos, Campus Barcelona, Villavicencio, Colombia, Colombia

Juan Manuel Trujillo-González

jtrujillo@unillanos.edu.co

Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad de los Llanos, Campus Barcelona, Villavicencio, Colombia, Colombia

Amanda Silva-Parra

asilvap@unillanos.edu.co

Universidad de los Llanos, Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales, Grupo de Investigación en Innovación en Sistemas Agropecuarios y Forestales, Villavicencio, Colombia, Colombia

Marlon Serrano-Gómez

marlon.Serrano@ecopetrol.com.co

Centro de Innovación y Tecnología Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), Ecopetrol S.A., Bucaramanga, Santander, Colombia, Colombia

Edgar Fernando Castillo-Monroy

edgar.castillo@ecopetrol.com.co

Centro de Innovación y Tecnología Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), Ecopetrol S.A., Bucaramanga, Santander, Colombia, Colombia

Marco Aurelio Torres-Mora

marcotorres@unillanos.edu.co

Resumen: Contextualización: los morichales son ecosistemas estratégicos porque almacenan una gran cantidad de carbono orgánico, contribuyen a la mitigación de gases de efecto invernadero y a la mitigación del cambio climático.

Vacío de la investigación: la estimación de las reservas de carbono en ecosistemas de morichal no se han estudiado en la Orinoquía colombiana.

Propósito: el objetivo de este estudio fue estimar las reservas de carbono en biomasa, necromasa y suelo de un morichal conservado de la altillanura colombiana.

Metodología: se muestrearon tres sectores con diferente etapa fenológica predominante: palmas senescentes, adultas y juveniles, y en cada sector se establecieron dos transectos, los cuales se dividieron en dos subparcelas [interior y ecotono]. Para la medición de la biomasa aérea se midieron individuos de *M. flexuosa* con diámetro a la altura del pecho (DAP) >10 cm y especies arbóreas y arbustivas con DAP >2,5 cm; en el ecotono se incluyeron las pasturas. La necromasa se evaluó considerando la caída, la que se mantiene en pie y la particulada. En ambos compartimientos se aplicaron ecuaciones alométricas y se multiplicaron por el factor de carbono. Las reservas de carbono orgánico en el suelo se estimaron en dos profundidades [0,0 – 0,30 m y 0,30 – 0,60m].

Resultados y conclusiones: los resultados muestran que la reserva de carbono en un morichal conservado de la altillanura colombiana alcanza los 590,8 Mg C/ha. El suelo presentó la más alta contribución con 436,5 Mg C/ha [74 % del total], seguido por la biomasa y necromasa [119,4 y 35,0 Mg C/ha], 20 y 6 % del total, respectivamente. Estos resultados muestran el papel fundamental de los ecosistemas de morichal como sumideros de carbono y su importancia para la mitigación del cambio climático, además de proveer otros beneficios ambientales para las comunidades.

Palabras clave: biomasa, carbono, ecosistema, materia orgánica, cambio climático, reserva natural, suelo.

Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad de los Llanos, Campus Barcelona, Villavicencio, Colombia, Colombia

Revista de Investigación Agraria y Ambiental
 Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Colombia
 ISSN: 2145-6097
 ISSN-e: 2145-6453
 Periodicidad: Semestral
 vol. 14, núm. 1, 2023
 riaa@unad.edu.co

Recepción: 20 Diciembre 2021
 Aprobación: 30 Mayo 2022
 Publicación: 17 Diciembre 2022

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/130/1303815009/>

DOI: <https://doi.org/10.22490/21456453.5531>

Financiamiento

Fuente: Convenio marco de colaboración
 N° de contrato: No. 5226521
 Beneficiario: SUMIDEROS NATURALES DE CARBONO:
 UN ESTUDIO DE CASO EN MORICHALES DE LA
 ALTILLANURA COLOMBIANA

<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/about>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.

CÓMO CITAR: Orozco-Hueje, D., Barreto-Rojas, D., Trujillo-González, J., Silva-Parra, A., Serrano-Gómez, M., Castillo-Monroy, E. y Torres-Mora, M. (2023). Sumideros naturales de carbono: un estudio de caso en morichales de la altillanura Colombiana. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 14(1), 177 - 199. <https://doi.org/10.22490/21456453.5531>

Abstract: Contextualization: Moriche palms are strategic ecosystems because they store a large amount of organic carbon, contribute to the mitigation of greenhouse gases, and to the softening of climate change.

Knowledge gap: The estimation of carbon reserves in moriche palms ecosystems have not been studied in the Colombian Orinoquía

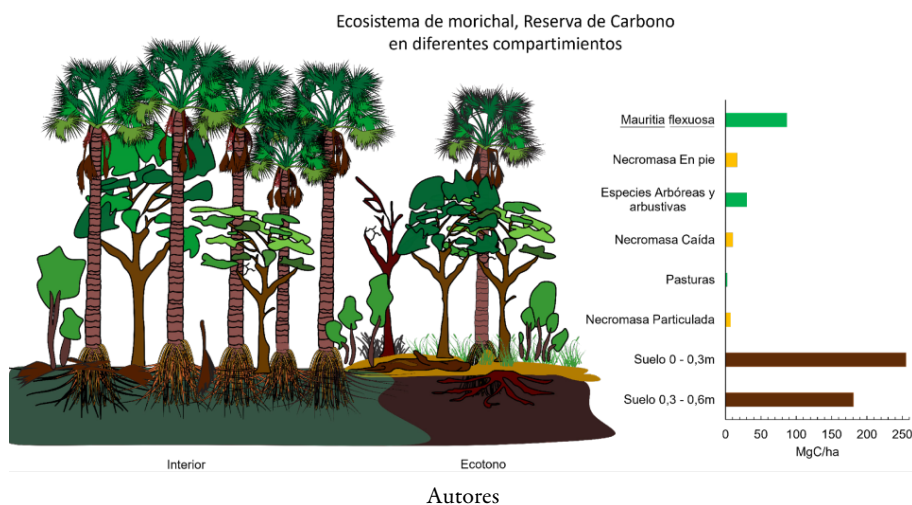
Purpose: The aim of this study was to estimate the carbon stocks in biomass, necromass and soil in a conserved morichal from the Colombian savanna.

Methodology: Three sectors with different predominant phenological stage were sampled: senescent, adult, and juvenile palms, and in each sector two transects were established, which were divided into two subplots [interior and ecotone]. For the measurement of aerial biomass, individuals of *M. flexuosa* with diameter at breast height (DBH) >10 cm and tree and shrub species with DBH>2.5 cm were measured; pastures were included in the ecotone. Necromass was evaluated considering the fall, the one that remains standing and the particulate. In both compartments allometric equations were applied and multiplied by the carbon factor. Soil organic carbon stocks were estimated at two depths [0.0 – 0.30 m and 0.30 – 0.60 m].

Results and conclusions: The results show that the carbon stock in a conserved moriche palm of the Colombian savanna reaches 590.8 Mg C/ha. The soil presented the highest contribution with 436.5 Mg C/ha [74 % of the total], followed by the biomass and necromass [119.4 and 35.0 Mg C/ha], 20 and 6 % of the total. These results show the fundamental role of moriche palms ecosystems as carbon sinks and their importance for climate change mitigation, also providing other environmental benefits for communities.

Keywords: biomass, carbon, climate change, ecosystem, nature reserve, organic matter, soil.

RESUMEN GRÁFICO



1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es uno de los problemas ambientales de mayor importancia en el mundo (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 1995; Masera y Benjamin, 2001; Santiago-Lastra et al., 2008; Banco Mundial, 2010; Raynal-Villaseñor, 2011; Gulev et al., 2021) y su principal causa está asociada a la generación antrópica de gases de efecto invernadero [dióxido de carbono [CO₂], metano [CH₄], óxido de nitrógeno [N₂O]], debido principalmente al consumo de recursos fósiles, a la agricultura y al cambio del uso del suelo (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2001; Silva-Parra et al., 2021). Entre estos gases, el dióxido de carbono [CO₂] se destaca por ser el segundo gas de importancia, luego del vapor de agua a nivel global (Masera y Benjamin, 2001; Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2007; Myhre et al., 2013; Andrew, 2020). De acuerdo con lo anterior, el IPCC (2019) plantea que la reducción de estos gases está comprometida en el futuro próximo, debido a los patrones de consumo de bienes y servicios de la población. Por eso, procesos como el almacenamiento de carbono en suelo y biomasa juegan un papel importante como potenciales sumideros de carbono¹ orgánico.

En Colombia, la deforestación y la quema de combustibles fósiles son los principales generadores de emisiones de gases de efecto invernadero [GEI] (IDEAM, 2016). Según el IDEAM y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2021), en el año 2020 se deforestaron 171685 ha, lo que muestra un aumento de la deforestación del 8 % con respecto al año 2019, y el departamento del Meta fue el de mayor deforestación con cerca de 6.500 ha en el año 2020. En 2017, las emisiones de GEI en Gigagramos [Gg] de CO₂-eq aumentaron cerca de un 11,9 % con respecto al 2016; las principales actividades emisoras fueron la agricultura, pesca, ganadería y silvicultura (AFOLU en inglés) con un aumento del 16,1 %, y las actividades manufactureras con un 24 % (Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE], 2019).

En este contexto nacional, para la mitigación del cambio climático, una de las estrategias es el manejo sostenible de los bosques naturales (Estenssoro, 2010; Banco Mundial y Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2014; DNP, 2020), debido a que estos desempeñan una importante función en el ciclo del carbono [C] y representan el mayor componente de acumulación terrestre con un 90 % del flujo anual de carbono entre la atmósfera y el suelo (Masera y Benjamín, 2001; Sánchez y Reyes, 2015). Además, proveen beneficios económicos directos y ambientales para las comunidades locales (Honorio et al., 2009; Moros et al., 2020). Con relación a esto, ecosistemas boscosos como los estratégicos de morichal garantizan la provisión de servicios ambientales, son capaces de mantener el equilibrio en los procesos ecológicos y conservar la biodiversidad y tienen tres funciones principales: reservas de agua, corredores de conservación de la biodiversidad y sumideros de carbono (Trujillo-González et al., 2011; Lasso et al., 2013). Como grandes acumuladores para la venta de C a nivel regional y nacional, estos sistemas almacenan más carbono [C] que los bosques naturales (Quinteros-Gómez et al., 2021). Lo que muestra su papel clave en la mitigación del cambio climático.

Los morichales son sistemas naturales característicos de la Orinoquía y Amazonía, denominados así por la especie *Mauritia flexuosa*. En Colombia, la planta es conocida como morichal o cananguchal y en Perú como aguajal (González-B., 2016). Es una palma gregaria y dominante del estrato arbóreo, que forma asociaciones a lo largo de ríos, caños y drenajes naturales en las sabanas altas o altillanuras (Galeano, 1991; Trujillo-González et al., 2011; Torres-Mora et al., 2015). Estas comunidades de bosque palmar son importantes proveedores de servicios ecosistémicos, incluyendo su condición de sumideros de carbono (González y Rial, 2011; Mitidieri, 2014; Honorio et al., 2015; Mozombite, 2015; Vilca, 2017; Lao, 2017; Tarrillo, 2020).

En este sentido, la presente investigación tuvo como objetivo estimar las reservas de carbono en necromasa, biomasa y suelo, y su distribución en tres sectores [senescente, adulto y juvenil] y dos subparcelas [interno y ecotono] de un sistema de morichal conservado [*Mauritia flexuosa*] de la altillanura colombiana, con el propósito de promover en el mediano y largo plazo este ecosistema como una estrategia en la captura de

carbono y de gestión ambiental, que contribuya a la mitigación del cambio climático con la venta de C. La hipótesis que se plantea es que las reservas de carbono en los ecosistemas de morichal de la altillanura colombiana varían de acuerdo con su edad fenológica predominante y si se evalúa dentro del ecosistema o en el ecotono.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio y recolección de muestras

El estudio se llevó a cabo en la finca Manacacías, con coordenadas geográficas $4^{\circ}10'27.4''N$ $72^{\circ}02'27.0''W$, ubicada en el municipio de Puerto Gaitán, departamento del Meta, correspondiente a la subregión de altillanura, en la región de la Orinoquía Colombiana [figura 1]. El morichal se distribuye a lo largo de las zonas de drenaje natural (Trujillo-González et al., 2011). En las últimas décadas, este paisaje ha presentado cambios en el uso del suelo, pasando de grandes sabanas con ganadería extensiva a grandes áreas con cultivos agrícolas perennes y transitorios (Podestá-Castro, 2016).

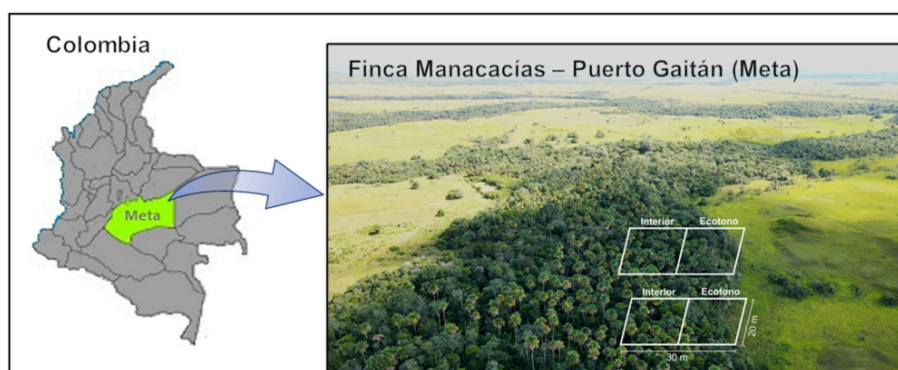


FIGURA 1.

Área de estudio, Finca Manacacías en el municipio de Puerto Gaitán, Meta.

Autores

El área de estudio presenta un régimen de lluvias con dos temporadas climáticas bien definidas: la temporada seca, desde los meses de diciembre hasta finales de marzo, con deficiencias hídricas de 252 mm/año; y la temporada húmeda, desde abril hasta noviembre, con excesos hídricos de 980,1 mm/año. La precipitación media anual es de 2230 mm y, en general, el 13 y 85 % de las precipitaciones se presentan en temporadas secas y húmedas, respectivamente. El promedio anual de la humedad relativa es del 81 % y oscila entre 72 y 87 %. La temperatura media anual es de 26,7 °C, con temperatura máxima y mínima de 34,8 y 20,2 °C, respectivamente. El brillo solar es de 1870 horas de sol con una media diaria de 5,2 horas/sol. Basándose en estas condiciones climáticas, se clasifica como clima húmedo tropical, según el método de Thornthwaite (IDEAM, 2016).

Los morichales son propios de suelos de sabana inundable, de la región Orinoquía, adaptados a los periodos secos e inundaciones intermitentes, lo que genera variaciones en el nivel freático y drenaje, limitando la regeneración de *M. flexuosa* de manera natural (Urrego, 2018; Narváez-Ortiz et al., 2021). Sin embargo, esta condición permite la acumulación de materia orgánica del suelo, dando como resultado aguas coloreadas ocre por el material orgánico húmico disuelto (Mora et al., 2008). Estos suelos están clasificados, según el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 1999), como *Espososoles* que están sentados sobre bancos de arena (IGAC, 1999). Son moderadamente profundos, presentan texturas gruesas a finas, son muy fuerte a extremadamente ácidos, con ligera toxicidad de aluminio.

Para el experimento, el muestreo de los morichales se realizó en tres sectores que se asocian a diferentes edades fenológicas predominantes de las plantas, donde se diferenciaron palmas jóvenes, adultas

y senescentes; se establecieron transectos de 20 m de ancho por 50 m de largo, dos para cada sector, y estos transectos se dividieron en dos subparcelas [ecotono e interior], en las cuales se tomaron las muestras para la determinación de las reservas de carbono en biomasa, necromasa y suelo. En cada subparcela se tomaron 3 muestras al azar.

Cálculos para las reservas de carbono en los diferentes compartimentos del morichal

Biomasa

Las reservas de C en la biomasa se estimaron a partir de la sumatoria de la biomasa de las palmas de *M. flexuosa*, especies maderables asociadas al ecosistema y las pasturas. Se tuvieron en cuenta las siguientes variables dasométricas: altura de planta y diámetro de altura al pecho [DAP] en palmas con un diámetro del fuste mayor a 10 cm y de 2,5 cm en las demás especies. Luego, se utilizaron fórmulas alométricas para el cálculo, descritas a continuación: Para la biomasa aérea de *M. flexuosa* se empleó la ecuación propuesta por Goodman et al. (2013) [Ecuación 1], y para las demás especies se aplicó la ecuación de Álvarez et al. (2012), que es la propuesta para Colombia [Ecuación 2].

Para la densidad de la madera se tomó como referencia lo propuesto por el IDEAM (2011), que varía dependiendo de cada especie, y cuando no se disponía de un valor para una determinada especie, se empleó un promedio del nivel taxonómico superior. Para la biomasa en pasturas se empleó la metodología de Yepes et al. (2011) [Ecuación 3], y se contabilizaron únicamente las hojas verdes [fotosintéticamente activas]. Las muestras de biomasa de pasturas se pesaron en fresco y se llevaron al horno para ser secadas a 65 °C por tres días y se pesaron nuevamente para obtener el peso seco (Ferrufino-Suárez et al., 2022).

$$BA_2 = \exp (2,4647 + 1,37777 * \ln (H))$$

[Ecuación 1]

$$BA_2 = \exp (-2,289 + 0,937 \ln (D^2 * H * D.M.))$$

[Ecuación 2]

$$BP = (Ps/Ph) * Ph$$

[Ecuación 3]

BA₂: Biomasa aérea [Mg/ha]; **BP**: Biomasa aérea de las pasturas [materia seca] [Mg/ha]; **H**: Altura total [m]; **D**: Diámetro [cm]; **D.M**: Densidad de la madera [g/cm³]; **Ps**: peso seco de la muestra; **Ph**: Peso húmedo de la muestra.

Los valores de la biomasa se presentan en toneladas por hectárea [Mg/ha]. Para el cálculo del contenido de las reservas de C en biomasa aérea de *M. flexuosa*, se multiplicó el resultado obtenido por 0,47 (Bhomia et al., 2019); el resultado de la biomasa aérea de las pasturas y demás especies asociadas se multiplicó por 0,5, que es la fracción de carbono establecida por el IPCC (Vilca, 2017).

Necromasa

Se establecieron transectos lineales dentro de cada subparcela para medir la necromasa caída y en pie. La necromasa caída [ramas y troncos de árboles sobre la superficie del suelo] se calculó con la ecuación empleada por Honorio et al. (2015) [Ecuación 4] y la necromasa en pie [palmas, tocones y árboles muertos aún anclados al suelo] con la ecuación 5, empleada por Chao et al. (2009) y Fonsêca et al. (2019). Se midió el diámetro mayor a 3 cm de la necromasa interceptada por el transecto lineal, en la necromasa en pie se midió también la altura. Se categorizó la densidad del material de acuerdo con su estado de descomposición: material duro

[0,5 g/cm³], medio [0,3 g/cm³], y suave [0,15 g/cm³] (García-Soria et al., 2012); con estos datos se calculó el volumen y se multiplicó por la densidad de cada material. Los valores de necromasa se convirtieron a toneladas por hectárea [Mg/ha] y posteriormente se estimó la reserva de C multiplicando el valor de la necromasa por la fracción de carbono [0,5] (García-Soria et al., 2012).

$$V = \pi^2 * (D^2 + D^2 + \dots + D_n^2) / 8 * L$$

[Ecuación 4]

$$V = H ((\pi (D_1/2)^2 + \pi (D_2/2)^2) / 2)$$

[Ecuación 5]

V: Volumen [m³]; D: Diámetro [cm]; L: Longitud del transecto [m]; H: altura [m]; D₁: Diámetro basal [m]; D₂: Diámetro apical [m]

Suelo

Las reservas de carbono orgánico (CO) del suelo se calcularon para cada profundidad, a distancias de 0 a 0,30 m y 0,30 a 0,60 m, según la metodología propuesta por el IPCC (2006) [Ecuación 6]. Se realizó un pretratamiento a las muestras de suelo, consistente en secarlas al ambiente y tamizarlas con una malla de 2 mm. La densidad aparente [g/cm³] se calculó mediante el método de la probeta, descrito por Lozano-Rivas (2016). El carbono orgánico (CO) del suelo se determinó en base seca con oxidación sulfocrómica, descrita en la Norma ISO 14235 (International Organization for Standardization [ISO], 1998).

$$\text{Reservas de CO del suelo} = \text{CO (\%)} * (\text{da} * 100) * \text{prof (m)}$$

[Ecuación 6]

Reservas de CO del suelo: [MgC/ha]; **CO:** Porcentaje de CO del suelo; **da:** Densidad aparente del suelo [g/cm³]; **Prof:** profundidad del suelo [m].

Análisis estadístico

Se aplicó un diseño en bloques completos al azar, con arreglo factorial 3x2 en tres repeticiones, para reservas de C en la biomasa de pasturas, necromasa particulada, caída y en pie, y suelo. El primer factor se refiere al sector o al estadio fenológico predominante en tres categorías: senescente, adulto y juvenil. El segundo factor corresponde a las subparcelas interior y ecotono. Se usó un tipo de ANOVA para establecer diferencias en las interacciones de los factores analizados. El F-test o contraste de la razón de varianzas consideró como hipótesis nula la varianzas que es igual entre los factores, y como hipótesis alterna la que es diferente; el F-test permitió rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alterna. Se empleó la prueba de Tukey para comparar las medias de las reservas del CO del suelo y la necromasa, y la prueba Scott & Knott para las medias de las reservas de C de la biomasa aérea, a un nivel de significancia $p < 0,05$. Se usó el software estadístico InfoStat versión 2020.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 1 se presentan los resultados de las estimaciones de C en la biomasa y necromasa y del CO del suelo a dos profundidades, en los tres sectores estudiados y las dos subparcelas [interior y ecotono].

TABLA 1.
Diferencias de medias de las reservas de C en la biomasa, necromasa y suelo de un morichal conservado de la altillanura colombiana.

Compartimiento		Reservas de C (MgC/ha)			Total (MgC/ha)	Contribución en el total (%)
		Ecotono	Interno	Subtotal		
Biomasa	<i>M. flexuosa</i>	34,8 b	51,7 a	86,6	119,4	20
	Pasturas	2,3	-	2,3		
	Especies Arbóreas y arbustivas	-	30,5	30,5		
Necromasa	Particulada	4,2 a	3,5 a	7,7	35,0	6
	Caída	3,1 a	7,3 a	10,4		
	En pie	13,8 a	3,0 b	16,8		
Suelo	0-0,30 m profundidad	120,5 ab	134,9 a	255,4	436,5	74
	0,30-0,60 m profundidad	81,3 b	99,8 ab	181,1		
Total		260,1	330,8	590,8	590,8	100
Contribución en el total (%)		44	56			

Autores.

Medias con una letra común en cada compartimiento [columnas] no son significativamente diferentes ($p > 0,05$) según la prueba de Tukey. Biomasa factor subparcela [ecotono e interno], D.E. [$\pm 3,09$ Mg C/ha]. Necromasa factor subparcela [ecotono e interno], D.E. [$\pm 1,35$ Mg C/ha]. Suelo factor profundidad [0-0,30m y 0,30-0,60m]*subparcela [ecotono e interno], D. E. [$\pm 13,60$ MgC/ha].

Se ha reportado que actividades como el avance de la frontera agrícola, el establecimiento de pasturas, explotación de hidrocarburos, incendios y manejo inadecuado del suelo de la Orinoquía han causado disminución de las poblaciones naturales de *M. flexuosa*, como de otras especies en estos ecosistemas (Torres-Mora et al., 2015), lo que puede afectar las reservas de C en los ecosistemas naturales de morichal.

Reservas de C en la biomasa

Los valores reportados en la tabla 1 muestran que el morichal conservado de la altillanura colombiana almacena en la biomasa aérea un total de 119,4 Mg C/ha, del cual el 72,5 % corresponde a individuos de *M. flexuosa* y el resto es aportado por otras especies. La prueba de Scott & Knott mostró que, entre las subparcelas interna y ecotono, se dieron diferencias estadísticas significativas [$p < 0,05$]. Esta diferencia está asociada a que las reservas de C en la biomasa de *M. flexuosa* en el interior superaron a las del ecotono en 16,9 Mg C/ha. Investigaciones en la Amazonía peruana han reportado reservas de C en la biomasa entre 51 a 193,9 Mg C/

ha (García-Soria et al., 2012; Mitidieri, 2014; Honorio et al., 2015), los mayores aportes se relacionan a los individuos de *M. flexuosa* con DAP mayor a 10 cm.

Las diferencias en las reservas de C de biomasa del ecosistema se deben en gran parte al número de individuos de *M. flexuosa* y a la composición florística acompañante de esta: su estructura, estado fenológico, clima y suelo (Pardos, 2010; García-Soria et al., 2012; Valderrama, 2013; Virapongse et al., 2017). Por otra parte, no se encontraron diferencias estadísticas significativas [$p < 0,05$] en las reservas de C en biomasa aérea, entre los estados fenológicos predominantes y las subparcelas (figura 2); sin embargo, es de resaltar en la figura 2 que en las subparcelas internas del sector de palmas juveniles y senescentes se muestran los valores más altos de reservas de C [57,3 y 51,4 Mg C/ha, respectivamente] y en la subparcela ecotono en el sector senescente [67,2 Mg C/ha].

En estudios realizados en aguajales de Perú se han reportado valores de 37,8 Mg C/ha (Lao, 2017); experimentos similares han señalado 42,5 y 40,3 Mg C/ha en morichales semidenso y mixto (Vilca, 2017), 24,4 Mg C/ha para morichal semidenso (Mestanza y Rivas, 2013) y Freitas et al. (2006) reportaron 87 y 17 Mg C/ha en denso y mixto, respectivamente, valores similares a los encontrados en este estudio. Según Isaza (2013) y Narváez-Ortiz et al. (2021), la baja cantidad de adultos en un morichal puede estar relacionada con una limitación de la regeneración natural en estos ecosistemas, que se viene presentando desde la década de los 90 y que ha permanecido hasta la actualidad, debido a condiciones ambientales y fenológicas y fenológicas, posiblemente lo que explica el aumento de las reservas de carbono en las palmas senescentes en el ecotono.

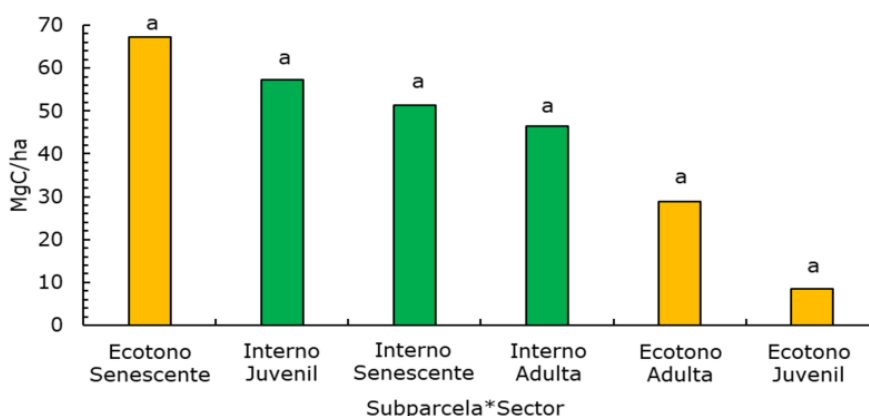


FIGURA 2.

Medias de las reservas de carbono en la biomasa aérea de *M. flexuosa* en la interacción sector (senescente, adulto y juvenil)*subparcela (interior y ecotono) de un ecosistema de la altillanura colombiana. Medias con una letra común no son significativamente diferentes [$p > 0,05$] según prueba de Scott & Knott, D. E. 6,76 Mg C/ha.

Autores.

Reservas de C en la necromasa

Las reservas de C en la necromasa del morichal fue de 35 Mg C/ha [tabla 1]. Este valor es superior a los reportados por García-Soria et al. (2012), entre 6,5 y 10,4 Mg C/ha, en morichales de la cuenca del río Aguaytía, Ucayali, Perú. En la tabla 1 se observa que la necromasa en pie es estadísticamente diferente [$p < 0,05$] entre el interior y ecotono, representando el 83,63 % de las reservas en el ecotono con 13,8 Mg C/ha [tabla 1]. En este estudio, las reservas de C de la necromasa total representaron el 29,3 %, comparadas con las de la biomasa aérea. Según Freitas et al. (2006), la necromasa en los ecosistemas de morichal representa entre el 10 y el 15 % de la biomasa aérea. No obstante, en el compartimiento del ecotono también se estimaron las reservas de C de la necromasa de las pasturas. La necromasa de árboles senescentes en los ecosistemas tropicales conforman una gran parte de las reservas de C y del reciclaje de nutrientes (Chao et al., 2009).

La figura 3a muestra que la interacción tipo de necromasa*sector no presentó diferencias estadísticas significativas ($p > 0,05$); sin embargo, la necromasa en pie del sector juvenil representó el valor más alto, seguido por la necromasa caída y en pie en palmas senescentes y adultas. Chao et al. (2009) afirman que la necromasa en bosques de la Amazonía varía dependiendo del tipo de vegetación, los suelos involucrados, y las tasas de mortalidad de las plantas según su estado fenológico; de acuerdo con Araujo-Murakami et al. (2011), en distintos ecosistemas la necromasa puede ser casi ausente, o menos de 60 Mg/ha de materia seca, constituyendo solo el 33 % de la biomasa aérea.

En la figura 3b se observan diferencias altamente significativas en las reservas de C en la interacción tipo de necromasa*subparcela (ecotono, interno). La necromasa en pie en el ecotono presentó una media más alta comparada con los otros tipos de necromasa y subparcela. Las reservas de C de la necromasa en pie encontrada en morichales de la altillanura de este estudio estuvieron entre 4,78 y 10,5 Mg C/ha para sector adulto y juvenil, respectivamente (figura 3a), y son similares a los resultados encontrados para necromasa en pie de aguajales en Perú, donde se reportan valores entre 4,2 y 11,1 Mg C/ha (Honorio et al., 2015). La acumulación de carbono en la necromasa caída y en pie, reportada en estudios del Perú, se encuentra entre 19,4 Mg C/ha (Araujo-Murakami et al., 2011) y 25,3 Mg C/ha (Baker et al., 2007), respectivamente. Por otra parte, los bosques de zonas no inundables contienen significativamente más volumen de madera muerta que los bosques inundables (Araujo-Murakami et al., 2011). Estas variaciones repercuten, posiblemente, en el reciclaje de nutrientes de estos ecosistemas, lo que influye en las reservas de CO.

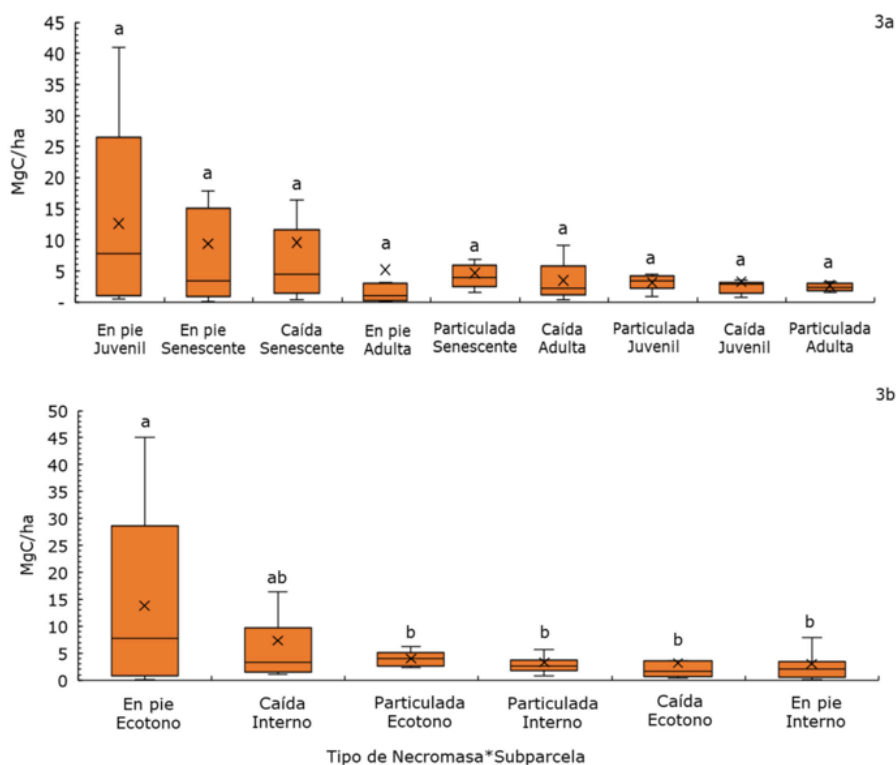


FIGURA 3 [A Y B].

a. Medias de las reservas de carbono en la interacción tipo de necromasa [particulada, caída y en pie]*sector [senescente, adulto y juvenil] de un morichal en la altillanura colombiana, D.E. (2,48 MgC/ha). b. Medias de las reservas de carbono en la interacción tipo de necromasa [particulada, caída y en pie]*subparcela [interno y ecotono] de un morichal en la altillanura colombiana, D.E. (2,02 MgC/ha). X en la gráfica corresponde a la media. Medias con una letra común no son significativamente diferentes [$p > 0,05$] según prueba de Tukey.

Autores.

Los valores encontrados, en este estudio, de las reservas de C de necromasa particulada, entre 3,32 y 3,94 Mg C/ha, para interior y ecotono, respectivamente (Figura 3b), difieren de los reportados por Mitidieri (2014), quien reportó una captura de carbono en hojarasca compuesta de material particulado, entre 1,17 y 1,73 Mg C/ha, y son similares a los reportados por Freitas et al. (2006), de 6,59 y 7,38 t C/ha, para morichal denso y mixto. Estos valores también varían de las reservas de C de necromasa particulada y caída de este estudio, que fueron de 7,3 y 10,8 Mg C/ha para ecotono e interior, respectivamente (Figura 3b).

Según Araujo-Murakami et al., (2011), la composición de los residuos de las especies puede afectar las tasas de descomposición del material vegetal, explicando posiblemente las diferencias encontradas en las reservas de C de necromasa particulada en la subparcela. Respecto a esto, la descomposición de los residuos orgánicos ocurre en tres fases: 1) fragmentación y mezcla con el suelo mineral efectuada por la macro y mega fauna [2-20 mm], 2) ruptura de grandes moléculas mediante la acción de enzimas liberadas por algunos hongos y bacterias y 3) asimilación y transformación de los productos solubles generados en la etapa anterior a través de los microorganismos del suelo [microflora y microfauna <100 µm] (FAO, 2017).

Reservas de carbono orgánico (CO) en el suelo

El morichal conservado de la altillanura tiene el potencial de almacenar 74 % de carbono orgánico, lo que es equivalente a 436,5 Mg C/ha, hasta los 0,6 m de profundidad, tanto en interior como en ecotono [tabla 1], considerado como el mayor depósito de carbono de los compartimientos evaluados. El suelo almacenó casi el 90 % del carbono del ecosistema (Draper et al., 2014; Bhomia et al., 2019). En contraste, el morichal interno, a una profundidad de 0 - 0,30 m, acumuló 134,9 Mg/ha de CO del suelo, 14,4 MgC/ha más que el morichal de ecotono [120,5 MgC/ha], lo que posiblemente esté relacionado con la mayor biomasa aérea de *M. flexuosa* en este sector.

Estos datos de acumulación de carbono en el suelo son cercanos a los reportados por García-Soria et al. (2012) en ecosistemas de morichal [197,8 MgC/ha] hasta los 0,5m de profundidad. Los horizontes superficiales hasta los 0,30 m de profundidad, donde se encuentra el mantillo del suelo, tienen una mayor dinámica en el ciclo del carbono orgánico del suelo, debido a que en el primer metro de profundidad se almacena alrededor del 50 % del carbono orgánico del suelo (Paz y Etchevers, 2016; FAO, 2017). Por otra parte, Avilés-Hernández et al. (2009), reportaron reservas de CO de 42,5 MgC/ha en el suelo de un sistema forestal, entre los 0,30–0,45 m de profundidad. Esto indicaría que, comparado con otros agroecosistemas, el ecosistema de *M. flexuosa* posee una gran capacidad en el almacenamiento de CO en el suelo, actuando como un sumidero importante de CO₂ del suelo a la atmósfera.

De acuerdo con esta investigación, las reservas del CO del suelo, en la profundidad de 0,30 – 0,60m, disminuyeron con respecto a los primeros centímetros, tanto en ecotono como interno (tabla 1); esto puede atribuirse, posiblemente, a los cambios texturales observados: de más arcilloso en superficie a más arenoso en profundidad, propio de *Espodosoles*(IGAC, 1999). Sin embargo, en horizontes profundos la acumulación de C puede ser más estable, con largos tiempos de residencia, por el transporte continuo, la inmovilización temporal, el procesamiento microbiano dentro del perfil del suelo y/o a la estabilización eficiente de la materia orgánica derivada de la raíz en la matriz del suelo (Rasse et al., 2005), o por los niveles freáticos (FAO, 2017). En consecuencia, Freitas et al. (2006) reportaron, a una profundidad de 1m, 369,1 y 336,2 Mg C/ha en morichales densos y mixtos, respectivamente; y Bhomia et al. (2019), en tres regiones de la cuenca del río Amazonas en Perú, reportaron reservas de carbono, medido a 1m de profundidad, entre 225 y 471 Mg C/ha, cuando evaluaron el CO del suelo a una profundidad mayor a 1m, las reservas fueron de 234 y 1067 Mg C/ha. Las reservas totales de CO del suelo encontradas en este estudio están en este rango, ofreciendo así una primera aproximación de la importancia de estos ecosistemas en el potencial de mitigación de GEI y cambio climático.

La figura 4a indica que las reservas de CO del suelo, en la interacción subparcela*sector, no presentaron diferencias significativas. Posiblemente debido a que la regeneración natural del ecosistema, que se está viendo afectada, influencia la cantidad del material vegetal orgánico generado en los otros compartimientos y, así

mismo, la producción de materia orgánica del suelo en el ecosistema. En condiciones naturales, el CO del suelo resulta del balance entre la incorporación al suelo del material orgánico fresco y la salida de C del suelo en forma de CO₂ a la atmósfera (IPCC, 2006) por la erosión y lixiviación de este material Valderrama (2013).

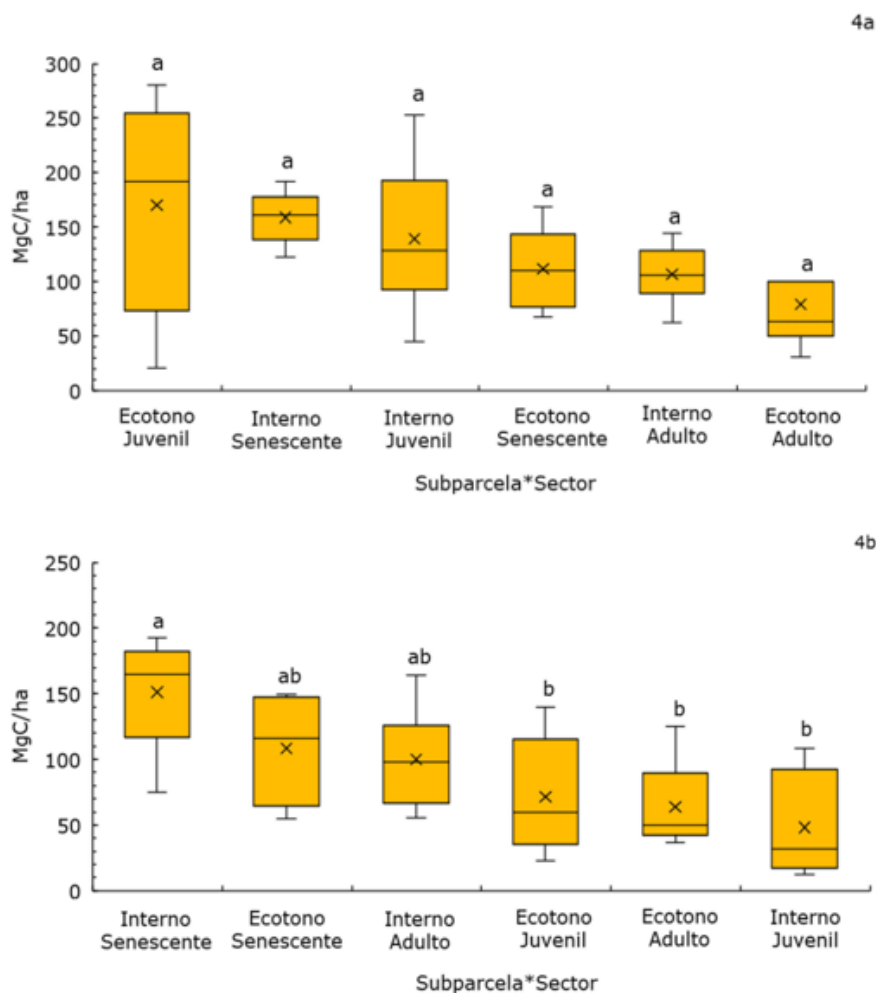


FIGURA 4.

4a. Reservas de Carbono Orgánico [CO] en el suelo de los 0-0,3 0m de profundidad en las subparcelas (interno y ecotono)*sector [senescente, adulto y juvenil] de un morichal de la altillanura colombiana.

D. E. [24,3 Mg C/ha]. 4b. Reservas de Carbono Orgánico [CO] en el suelo de los 0,3-0,6 m de profundidad en las subparcelas [interno y ecotono] *sectores [senescente, adulto y juvenil] de un morichal de la altillanura colombiana. D.E. (16,24 Mg C/ha). X en la gráfica corresponde a la media. Medias con una letra común no son significativamente diferentes [$p > 0,05$] según la prueba de Tukey.

Autores.

La Figura 4b muestra que el tipo de edad del morichal en la subparcela [interno, ecotono] influencia las reservas de CO del suelo, la subparcela [interno*senescente] difirió del ecotono* juvenil y adulto, e interno*juvenil, que estadísticamente fueron similares [$p > 0.05$] [Figura 4b]. Las reservas totales en el ecotono están en el rango entre 63,9 y 108,5 Mg C/ha, para adulto y senescente, respectivamente; esto estaría confirmando que, posiblemente, las reservas del CO del suelo en el ecosistema son influenciadas más por la edad del morichal que por el mismo sector. De acuerdo con lo anterior, el material senescente del morichal, con menor relación C/N, haría parte de la fracción más lábil del suelo y del reciclado de nutrientes en este ecosistema, principalmente en los primeros centímetros de suelo. En la materia orgánica del suelo (MOS) se

distingue una fracción lábil, disponible como fuente energética, que mantiene las características químicas de su material de origen (hidratos de carbono, ligninas, proteínas, taninos, ácidos grasos), y una fracción húmica, más estable, constituida por ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y huminas (FAO, 2017).

Por lo expuesto anteriormente, se deberá conservar el ecosistema de *M. flexuosa* de la altillanura y evitar el efecto antrópico por cambios en el uso del suelo, que altera su equilibrio ecológico, con el fin de proteger el morichal y las otras especies; lo anterior permite la continuidad del proceso de secuestro de carbono orgánico en el suelo, teniendo en cuenta que los morichales se ha establecido como el mayor reservorio de C en todo el ecosistema evaluado.

4. CONCLUSIONES

Los ecosistemas de *M. flexuosa* representan una oportunidad importante en los procesos de mitigación de cambio climático, debido a que tienen la capacidad de almacenar gran cantidad de carbono orgánico en biomasa y suelo, otorgando a estos ecosistemas una gran capacidad de captación del CO₂ atmosférico y, por tanto, de regulación del cambio climático global. Los resultados de este estudio mostraron que el ecosistema de morichal logró almacenar aproximadamente 2,82 veces más carbono orgánico dentro del compartimiento suelo que en biomasa y necromasa, lo que resalta la importancia de esta sección como sumidero de carbono.

Se pudo establecer que la acumulación de carbono orgánico en el ecosistema de morichal es influenciada por el tipo de compartimiento, el estado fenológico de *M. flexuosa* (sector) y de la subparcela (ecotono e interior). Las estimaciones de las reservas de carbono orgánico, en los diferentes compartimientos del ecosistema de morichal de la altillanura (Orinoquía), mostraron altas semejanzas con reportes de investigaciones en aguajales de la Amazonía Peruana, que poseen características de paisaje geográfico diferente. En este sentido se deberán estudiar, a mayor profundidad, los efectos de las condiciones edafoclimáticas de la zona que permitan comprender el flujo de carbono en los diferentes compartimientos asociados a *M. flexuosa* y su relación con las actividades antrópicas en la Orinoquía colombiana. Estos análisis podrían servir como soporte para la conservación de este ecosistema estratégico, ya que permite la mitigación del CO₂ atmosférico y la venta de bonos de carbono.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el convenio marco de colaboración No. 5226521 entre la Universidad de los Llanos y Ecopetrol, al Centro de Innovación y Tecnología del Instituto Colombiano de Petróleo (ICP) y al personal del Instituto de Ciencias Ambientales de la Orinoquía Colombiana (ICAOC) en la Universidad de los Llanos.

LITERATURA CITADA

- Álvarez, E., Duque, A., Saldarriaga, J., Cabrera, K., De Las Salas, G., Del Valle, I., Lema, Á., Moreno, F., Orrego, S. & Rodríguez, L. (2012). Tree above-ground biomass allometries for carbon stocks estimation in the natural forests of Colombia. *Forest Ecology and management*, 267(1), 297-308. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.12.013>
- Araujo-Murakami, A., Parada, A. G., Terán, J. J., Baker, T. R., Feldpausch, T. R., Phillips, O. L. y Brienen, R. J. (2011). Necromasa de los bosques de Madre de Dios, Perú; una comparación entre bosques de tierra firme y de bajíos. *Revista Peruana de Biología*, 18(1), 113-118. <https://doi.org/10.15381/rpb.v18i1.155>
- Andrew, R. M. (2020). A comparison of estimates of global carbon dioxide emissions from fossil carbon sources. *Earth System Science Data*, 12(2), 1437-1465. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1437-2020>

- Avilés-Hernández, V., Velázquez-Martínez, A., Ángeles-Pérez, G., Etchevers-Barra, J., De los Santos-Posadas, H. y Llanderal, T. (2009). Variación en almacenes de carbono en suelos de una toposecuencia. *Agrociencia*, 43(5), 457-464.
- Baker, T. R., Coronado, E. N., Phillips, O. L., Martin, J., Van der Heijden, G. M. F., García, M. & Silva, J. (2007). Low stocks of coarse woody debris in a southwest Amazonian Forest. *Oecologia*, 152, 495-504. <https://doi.org/10.1007/s00442-007-0667-5>
- Banco Mundial. (2010). Informe sobre el desarrollo mundial: Desarrollo y cambio climático. <https://documents1.worldbank.org/curated/es/985501468170350669/pdf/530770WDR00SPA00Box0361490B0PUBLIC0.pdf>
- Banco Mundial y Departamento Nacional de Planeación. (2014). Desarrollo de Bajo Carbono para Colombia. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Ambiente/Desarrollo%20Bajo%20En%20Carbono%20Para%20Colombia.pdf>
- Bhomia, R. K., Van Lent, J., Grandez, J. M., Hergoualc'h, K., Honorio, E. N. & Murdiyarsa, D. (2019). Impacts of *Mauritia flexuosa* degradation on the carbon stocks of freshwater peatlands in the Pastaza-Marañón river basin of the Peruvian Amazon. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 24(4), 645-668. <https://doi.org/10.1007/s11027-018-9809-9>
- Chao, K. J., Phillips, O. L., Baker, T. R., Peacock, J., Lopez-Gonzalez, G., Vásquez, R., Monteagudo, A. & Torres-Lezama, A. (2009). After trees die: quantities and determinants of necromass across Amazonia. *Biogeosciences*, 6(8), 1615-1626. <https://doi.org/10.5194/bg-6-1615-2009>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (1995). Cambio climático, bosques y ordenación forestal: Una visión de conjunto. <https://www.fao.org/3/v5240s/v5240s.pdf>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (2019). Cuenta ambiental y económica de flujos de materiales - Cuenta de emisiones al aire 2016 - 2017 provisional. https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/cuentas_ambientales/cuenta-ambiental-economica-flujos-materiales/bl-ct-emisiones-al-aire-pyc-combustibles2016-2017p.pdf
- Departamento Nacional de Planeación [DNP]. (2020). Política nacional para el control de la deforestación y la gestión sostenible de los bosques. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Economicos/4021.pdf>
- Draپر, F.C., Roucoux, K. H., Lawson, I. T., Mitchard, E. T., Honorio, E. N., Lähteenoja, O., Torres, L., Valderrama, E., Zárate, R. & Baker, T. R. (2014). The distribution and amount of carbon in the largest peatland complex in Amazonia. *Environmental Research Letters*, 9, 1-12. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/12/124017>
- Estenssoro, F. (2010). Crisis ambiental y cambio climático en la política global: un tema crecientemente complejo para América Latina. *Universum*, 25(2), 57-77. <https://doi.org/10.4067/S0718-23762010000200005>
- Ferrufino-Suárez, A. J., Mora-Valverde, D. y Villalobos-Villalobos, L. A. (2022). Biomasa y bromatología del pasto Estrella Africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst) con cinco periodos de rebrote. *Agronomía Mesoamericana*, 33(2), 1-15. <https://doi.org/10.15517/am.v33i2.47746>
- Fonsêca, N. C., Meunier, I. M. J. & Borges, A. C. (2019). Evaluation of the Plant Necromass Component: Methodological Approaches and Estimates in Atlantic Forest, Northeast Brazil. *Floresta e Ambiente*, 26(3), 1-10. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.38318>
- Freitas, L., Otárola, E., Del Castillo, D., Linares, C., Martínez, P. y Malca, G. (2006). Servicios ambientales de almacenamiento y secuestro de carbono del ecosistema aguajal en la reserva nacional Pacaya Samiria, Loreto - Perú. Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana. <https://hdl.handle.net/20.500.12921/228>
- Galeano, G. (1991). Las palmas de la región de Araracuara (Amazonia colombiana). *Tropenbos-Colombia*.
- García-Soria, D., Honorio, E. y Del Castillo, D. (2012). Determinación del stock de Carbono en Aguajales de la cuenca del río Aguaytía, Ucayali, Perú. *Folia Amazónica*, 21 (1-2). <https://doi.org/10.24841/fa.v21i1-2.43>
- Goodman, R. C., Phillips, O. L., Del Castillo, D., Freitas, L., Tapia, S., Monteagudo, A. & Baker, T. R. (2013). Amazon palm biomass and allometry. *Forest Ecology and Management*, 310, 994-1004. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.09.045>

- González, B. V. (2016). Los palmares de pantano de *Mauritia flexuosa* en Suramérica: una revisión. En C. A. Lasso, G. Colonello, M. Moraes. (Eds.). *Morichales y canaguales de la Orinoquia y Amazonia: Colombia- Venezuela: Parte 2* (pp. 45-83). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- González, V. y Rial, A. (2011). Las comunidades de morichal en los Llanos Orientales de Colombia, Venezuela y el Delta del Orinoco: impactos de la actividad humana sobre su integridad y funcionamiento. En C. A. Lasso, A. Rial, C. I. Matallana, W. Ramírez, J. C. Señaris, A. Díaz-Pulido, G. Corzo, A. Machado-Allison. (Eds.). *Biodiversidad de la cuenca del Orinoco: II. Áreas prioritarias para la conservación y uso sostenible* (pp. 125-146). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Gulev, S. K., Thorne, P. W., Ahn, J., Dentener, F. J., Domingues, C. M., Gerland, S., Gong, D., Kaufman, D. S., Nnamchi, H. C., Quaas, J., Rivera, J. A., Sathyendranath, S., Smith, S. L., Trewin, B., von Schuckmann, K. & Vose, R. S. (2021). *Changing State of the Climate System. Climate Change 2021: The Physical Science Basis* (pp. 287-422). Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Honorio, E., Corrales, M., Vásquez, A., Irarica, J., Saavedra, N. y Vásquez, H. (2009). Evaluación de almacenamiento y secuestro de carbono en aguajales de Loreto, Perú. *Memoria institucional 2009: Loreto, Ucayali, San Martín, Madre de Dios, Huánuco (Tingo María) y Amazonas* (pp. 31-32). Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana.
- Honorio, E., Vega, J. y Corrales, M. (2015). Diversidad, estructura y Carbono de los bosques aluviales del noreste peruano. *Folia Amazónica*, 24 (1), 55 – 70. <https://doi.org/10.24841/fa.v24i1.59>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (1999). *Paisajes fisiográficos de Orinoquia - Amazonia (ORAM) Colombia*. Ministerio de Hacienda y Crédito Público.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. (2007). *Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático*.
- Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales [IDEAM]. (2016). *Inventario nacional y departamental de gases efecto invernadero*. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023634/INGEI.pdf>
- Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales [IDEAM] y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). *Resultados del monitoreo deforestación: 1. Año 2020. 2. Primer Trimestre año 2021*. http://www.ideam.gov.co/documents/10182/113437783/Presentacion_Deforestacion2020_SMBYC-IDEAM.pdf
- Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales IDEAM (2011). *Estimación de las reservas potenciales de carbono almacenadas en la biomasa aérea en bosques naturales de Colombia*.
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2001). *Climate Change 2001: Synthesis Report*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_TAR_full_report.pdf
- Isaza, C. (2013). *Moriche o canangucho (Mauritia flexuosa)*. En R. Bernal y G. Galeano. (Eds.). *Cosechar sin destruir: aprovechamiento sostenible de palmas colombianas* (pp. 135-142). Universidad Nacional de Colombia.
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Volume 4): Agriculture, Forestry and Other Land Use*. Institute for Global Environmental Strategies.
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2019). *Calentamiento global de 1,5 °C*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf
- International Organization for Standardization [ISO]. (1998). *Soil Quality-Determination of Organic Carbon by Sulfochromic Oxidation*. Croatian Standards Institute.
- Jumbo-Salazar, C. A., Arévalo, C. D. y Ramírez-Cando, L. J. (2018). *Medición de carbono del estrato arbóreo del bosque natural Tinajillas-Limón Indanza, Ecuador*. *La granja*, 27(1), 51-63. <https://doi.org/10.17163/lgr.n27.2018.04>
- Lao, L. L. (2017). *Captura de carbono mediante estimación de biomasa aérea y necromasa en la zona de aguajales del alto mayo, sector Tingana Moyobamba-San Martín 2017 [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]*. Repositorio de la Universidad César Vallejo. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/3563>
- Lasso, C. A., Rial, A. y González, V. (2013). *VII. Morichales y canangunchales de la Orinoquia y Amazonia: Colombia - Venezuela. Parte I*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

- Santiago-Lastra, J. A., López-Carmona, M. y López-Mendoza, S. (2008). Tendencias del cambio climático global y los eventos extremos asociados. *Ra Ximhai*, 4(3), 625-634. <https://doi.org/10.35197/rx.04.03.2008.06.js>
- Lozano-Rivas, W. A. (2016). *Suelos: Guía de prácticas simplificadas en campo y laboratorio*. Universidad Piloto.
- Masera, O. y Benjamín, J. A. (2001). Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y bosques*, 7(1), 3-12. <https://doi.org/10.21829/myb.2001.711314>
- Mestanza, C. D. y Rivas, J. A. (2013). Cuantificación de los servicios ambientales de secuestro de carbono en *Mauritia flexuosa*. En el predio estatal denominado zona de conservación y recuperación de ecosistemas (ZOCRE), humedal del alto Mayo, sector Tingana-Moyobamba [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Martín]. Repositorio institucional. <https://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/228>
- Mitidieri, N. (2014). Reservas de Carbono y composición florística en dos parcelas de 0,5 ha en bosques pantanosos "aguajales" cercanos a las comunidades Quistococha y San Jorge en Loreto, Perú [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana]. Archivo digital. <https://1library.co/document/yj743kky-reservas-composicion-floristica-parcelas-pantanosos-aguajales-comunidades-quistococha.html>
- Mora, A., Sánchez, L., Mac-Quhae, C., Visáez, F. y Calzadilla, M. (2008). Geoquímica de los ríos morichales de los llanos orientales venezolanos. *Interciencia*, 33(10), 717-724.
- Moros, L., Corbera, E., Vélez, M. A. & Flechas, D. (2020). Pragmatic conservation: Discourses of payments for ecosystem services in Colombia. *Geoforum*, 108, 169-183. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2019.09.004>
- Mozombite, M. (2015). Valoración económica del secuestro de CO₂ y de la producción de oxígeno en plantaciones de *Mauritia flexuosa* L. f. en Puerto Almendra, Iquitos-Perú [Tesis de pregrado. Universidad Nacional de la Amazonía Peruana]. Repositorio Institucional Digital.
- Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F. M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J. F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T. & Zhang, H. (2013). Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Narváez-Ortiz, I., Ortiz, R. A. y López, E. (2021). Regeneración pasiva de morichales (*Mauritia flexuosa* L. f.) en los Llanos Orientales de Colombia. *Ecosistemas*, 30 (3), 1-6. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2230>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura [FAO]. (2017). Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto. <https://www.fao.org/3/i6937s/i6937s.pdf>
- Pardos, J. A. (2010). Los ecosistemas forestales y el secuestro de Carbono ante el calentamiento global. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria.
- Paz, F. y Etchevers, J. (2016). Distribución a profundidad del carbono orgánico en los suelos de México. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 339-355.
- Podestá Castro, P. (2016). Transformación productiva de las sábanas de la altillanura colombiana [Trabajo de pregrado, Pontificia Universidad Católica Argentina]. Repositorio Institucional UCA. <https://repositorio.uca.edu.ar/handle/123456789/447>
- Quinteros-Gómez, Y. M., Monroy-Vilchis, O. y Zarco-González, M. M. (2021). Turberas en Valle del Alto Mayo, Perú: importancia, amenazas y perspectivas de conservación. *Ciencia ergo-sum*, 28(1). <https://doi.org/10.30878/ces.v28n1a10>
- Rasse, D., Rumpel, C. & Dignac, M. 2005. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant and Soil*, 269(1), 341-356. <https://doi.org/10.1007/s11104-004-0907-y>
- Raynal-Villaseñor, J. A. (2011). Cambio climático global: una realidad inequívoca. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 12(4), 421-427. <https://doi.org/10.22201/ifi.25940732e.2011.12n4.041>
- Tarrillo, L. (2020). Evaluación de la cantidad de carbono capturado por el aguajal (*Mauritia flexuosa* L.) en el sector de Tangumi, Calzada - Moyobamba - San Martín. [Tesis de pregrado, Universidad Católica Sedes Sapientiae]. Repositorio institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.14095/824>
- Sánchez, L. y Reyes, O. (2015). Medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático en América Latina y el Caribe: Una revisión general. Comisión Económica para América Latina y el Caribe.

- Silva - Parra, A., Trujillo - González, J. M. & Brevik, E. C. (2021). Greenhouse gas balance and mitigation potential of agricultural systems in Colombia: A systematic analysis. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 11(3), 573-589. <https://doi.org/10.1002/ghg.2066>
- Torres-Mora, M. A., Rubio-Cruz, M. A. & Trujillo-González, J. M. (2015). Approximation of the socio-cultural importance of the Moriche palm tree (*Mauritia flexuosa* LF) in the Wacoyo indigenous community (Sikuani) in the municipality of Puerto Gaitán, Colombia. *Orinoquia*, 19(2), 231-236. <https://doi.org/10.22579/20112629.337>
- Trujillo-González, J. M., Torres-Mora, M. A. y Santana-Castañeda, E. (2011). La palma de Moriche (*Mauritia flexuosa* Lf.) un ecosistema estratégico. *Orinoquia*, 15(1), 62-70. <https://doi.org/10.22579/20112629.43>
- Urrego, L. E. (2018). Cananguchales y manglares: humedales forestales de las zonas bajas tropicales, tan semejantes como contrastantes. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 42(162), 80. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.553>
- Valderrama, E. (2013). Floristics and above-ground biomass (AGB) in Peatlands in Peruvian Lowland Amazonia, Loreto - Peru. [Tesis de maestría, Universidad de Misuri]. Institutional Repository Library. <https://irl.umsl.edu/thesis/26>
- Vilca, N. 2017. Almacenamiento de CO₂ en biomasa aérea de las familias arecaceae y bombaceae de un ecosistema aguajal en Posíc, San Martín-2017. [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio digital institucional <https://hdl.handle.net/20.500.12692/3637>
- Virapongse, A., Endress, B. A., Gilmore, M. P., Horn, C. & Romulo, C. (2017). Ecology, livelihoods, and management of the *Mauritia flexuosa* palm in South America. *Global Ecology and Conservation*, 10, 70-92. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2016.12.005>
- Yepes, A. P., Navarrete D. A., Duque A. J., Phillips J. F., Cabrera K. R., Álvarez, E., García, M.C. y Ordoñez, M. F. (2011). Protocolo para la estimación nacional y subnacional de biomasa - carbono en Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales.

NOTAS

- ¹ Un reservorio de C es el proceso mediante el cual el carbono se fija desde la atmósfera a través de plantas o residuos orgánicos y se almacena en el suelo (IPCC, 2006).

ENLACE ALTERNATIVO

<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/5531> (html)

<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/5531/5960> (pdf)