

EXPLORACIÓN DEL SECUESTRO DE CARBONO EN MORICHALES USANDO ESTUDIOS DE CAMPO Y TELEDETECCIÓN

Exploration of carbon sequestration in morichales using field studies and remote sensing

Santiago Ramos Oropeza^{1,3}, Elisabeth Gordon Colón^{2,3}, Carolina Peña Colmenarez³ y Laura Delgado Petrocelli^{1,3}

Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ciencias, IZET/¹Centro de Ecología Aplicada /Laboratorio de Ecología de Sistemas (LES).²Centro de Ecología y Evolución/Laboratorio de Plantas Acuáticas (LEPA). ³Miembros activos del Grupo Humedales de Venezuela. ramosantiago@gmail.com.

RESUMEN

Entre los servicios ecosistémicos de los bosques, hoy día, ante la crisis ambiental, es necesario explorar lo relacionado al cambio climático (CC). Se revisa la ventaja de utilizar el análisis espacio-temporal mediante técnicas de teledetección para estimar, con niveles aceptables de incertidumbre, la biomasa acumulada en áreas de bosques en términos de biomasa y de carbono orgánico. La bibliografía muestra experiencias exitosas de estimaciones en los varios compartimientos de esa estructura. Mediante ecuaciones alométricas se extrapola la cantidad de carbono total por hectárea en la biomasa. Los bosques como todos los ecosistemas están sujetos a factores que hacen variar su biomasa y las transferencias del carbono entre sus compartimientos. En una primera aproximación se utilizó una imagen del satélite Landsat 9/Sensor OLI2, 14 bits por píxel y nueve bandas multiespectrales, resolución espacial de 30 metros, para establecer cuanto carbono puede acumularse en las áreas de bosques dominados por *Mauritia flexuosa*, asociada al humedal del río Tigre (estado Anzoátegui). Se realizaron las primeras estimaciones utilizando los datos de campo tomados en el humedal, las correlaciones alométricas y las evaluaciones en la imagen de satélite. Ello permitió establecer la distribución espacial del bosque, desde las riveras a lo largo del continuo donde se expresa la comunidad del bosque. Posteriormente se estimará su variación temporal en el ciclo estacional, con la finalidad de aproximar la dinámica del carbono acumulado, que permita generar recomendaciones válidas de mitigación, conservación y manejo sustentable.

Palabras clave: Secuestro de carbono, CO₂, mitigación, teledetección, morichales.

Keywords: Carbon sequestration, CO₂, mitigation, remote sensing, swamp palm forest.

INTRODUCCIÓN

Los bosques contribuyen a la mitigación del impacto del cambio climático a través del almacenamiento, y la absorción de carbono; pero esta reserva de carbono varía en el espacio y su dinámica aún es poco conocida. La teledetección y el uso de nuevas tecnologías de la informática como Inteligencia Artificial (IA) y la "Big Data" (BD) están siendo ya utilizadas por las agencias espaciales mundiales para abordar este problema (Ejs.: GEDI

de la NASA, el NISAR de la NASA-ISRO y el BIOMASS de la ESA). Sin embargo, todos sus productos requieren una validación independiente y consistente hasta llegar a un sistema de medición de referencia de biomasa forestal permanente para conseguir una minimización de la incertidumbre asociada a las estimaciones de carbono y sus tasas de flujo. Asimismo, se requiere llegar a un sistema de medición de referencia de biomasa forestal permanente y robusto, que arroje estimaciones calibradas con datos de campo de la mayor calidad posible, que permitan optimizar las evaluaciones que se derivan de la investigación y sirvan de base en la elaboración de políticas en cuanto a la mitigación del CO₂, principal GEI, así como para la conservación, restauración y manejo sustentable de los bosques asociados a los humedales. Los datos deben recopilarse y procesarse de forma tal, que sean la base objetiva para formular políticas nacionales y regionales asertivas en cuanto a la mitigación estandarizada del CO₂, a través del secuestro de carbono, para definir la contribución de cada tipo de bosque al proceso total. El presente trabajo es exploratorio y representa una fase inicial para identificar cuáles sitios son representativos y cuál hoja de ruta metodológica permitirá reducir la incertidumbre de las estimaciones de carbono retenido en cada compartimiento de los bosques. La intención de este desarrollo es la recopilación de datos con niveles de baja incertidumbre que al procesarse conformen una base sólida para la formulación de políticas nacionales y regionales asertivas en la mitigación estandarizada del CO₂ a través del secuestro de carbono, en las cuales se conozca en cuanto contribuye cada tipo de bosque al proceso total.

El vector de hipótesis que representa el núcleo de la investigación se resume en el segmento del ciclo de carbono que se sucede en los bosques amazónicos, tal como lo discuten Honorio y Baker (2010), que se presenta esquemáticamente en la Figura 1. El esquema considera los compartimientos donde se acumula el carbono en la biomasa viva aérea, tanto de los fustes, hojas y ramas (BA), como en la biomasa subterránea (BS) constituida fundamentalmente por las raíces, luego en la biomasa muerta sobre el suelo que conforman la hojarasca y restos de material leñoso, finalmente el compartimiento del carbono orgánico del suelo (COS), en diversos tenores de descomposición hacia su mineralización. Pero estos compartimientos están sujetos a una dinámica de procesos de transferencia entre ellos, desde la captura del carbono a partir del CO₂ atmosférico, mediado por la fotosíntesis y compensado por la reintegración activa del carbono a la atmósfera por medio de la respiración, y la metanogénesis producto de la descomposición (Hernández, 2010), que en los bosques de morichal puede ser exacerbada en la fracción espacial de distribución horizontal, asociada a la lámina de agua del conspicuo complejo orillar que forman estas comunidades vegetales, que caracteriza su condición de humedal de ríos de bajo caudal, que puede llegar a formar turberas (González y Rial, 2013), de tal forma, que la investigación orientada hacia la estimación del potencial de reducción activa del CO₂ en estos

bosques, debe aproximar los procesos de acumulación o retención neta, pero también la dinámica de aquellos asociados al ciclo biogeoquímico del carbono en el bosque durante el ciclo anual climático.

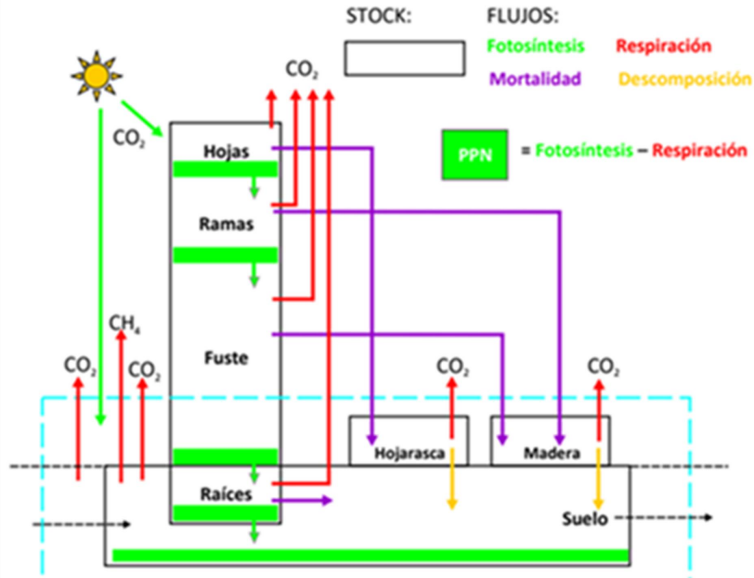


Figura 1. Esquema conceptual del segmento del ciclo del carbono en un bosque tropical amazónico. Fuente: Honorio y Baker (2010).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se seleccionó como zona de exploración inicial el segmento de los bosques de morichales de la cuenca alta del río Tigre (estado Anzoátegui), donde se realizó el estudio previo de este humedal (Peña-Colmenarez y Gordon-Colón, 2019) con el fin de utilizar los datos recolectados en el campo para utilizarlos en los cálculos alométricos y calibrar las ecuaciones para las estimaciones de biomasa y carbono por hectárea. En un segundo tramo se seleccionó la imagen LC09_L2SP_002054_20220105 multiespectral del 05/01/2022 (170km x 183 km de cobertura) del satélite LandSat9, colección 2 del su sensor OLI2 (Operational Land Imager) con 30m de resolución espacial, 14 bits de resolución radiométrica y 8 días de frecuencia en el tiempo de revisita, la cual se procesó utilizando el software QGIS, Ver 3.28.3 Firenze. Para la determinación de biomasa del bosque (B) y del carbono en esa biomasa (C), se utilizan ecuaciones alométricas, que se basan en el diámetro del árbol a la altura del pecho (1,30 m) (D en cm) (Nascimento y Laurance, 2002), y la altura de los fustes (Pearson y col.,

2005), la cual puede ser desde la base en el suelo hasta la base de la corona (H tallo, o H bc en m), o la altura desde el suelo hasta la corona (H total en m), y la densidad de la madera: (ρ , masa seca/volumen en gr/cm^3) (Chave y col., 2005, 2014). En este trabajo, las estimaciones de la biomasa área del moriche (BA) y la subterránea o radical (BS) se realizaron en base a las ecuaciones de Goodman y col. (2013), donde $\text{Ln}(\text{BA}) = 2.4647 + 1.3777 \ln(\text{Htallo})$ y $\text{Ln}(\text{BR o BS}) = -0.3688 + 2.0106 \times \ln(\text{BA})$. Carbono orgánico (CO) = Biomasa * 0,5. Se estimó el CO total del morichal sumando los componentes de la BA, BS y del suelo (COS) a través de ocho estaciones de muestreo. Los cálculos no incluyeron la biomasa de los árboles acompañantes. Además, se estimó el CO del suelo (COS) con la profundidad (cm), a partir de los datos de textura con lo cual se estimó la densidad aparente (gr/cm^3), y % materia orgánica (MO) reportados por (Peña-Colmenarez y Gordon Colón, 2019). El % de MO se transformó en $\% \text{CO} = \% \text{MO} / 1,724$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Segmento de Teledetección. El uso de imágenes satelitales permite el análisis espacio temporal de la masa boscosa de una región. En el estudio, sólo se estableció como primer paso de la exploración, la estimación del área del bosque sobre la imagen seleccionada del sensor OLI, del mes de enero del año 2022, al ubicar la misma zona del estudio de campo (Peña-Colmenarez y Gordon-Colón, 2019). La Figura 2 muestra esa área sobre la imagen satelital en color real tomada del sistema Google Earth, sobre la cual se localizaron las 8 estaciones de campo. Luego, sobre la imagen del satélite LandSat-OLI se determinó un área equivalente a 210.670,88 ha., denominada como el área de interés (ADI). En la Figura 2, extremo derecho superior, se observa el ADI en la combinación de bandas 6, 5, 4 de la imagen multispectral, y luego, a la imagen resultante se aplicó el algoritmo de clasificación supervisada sólo sobre el ADI (usando el software QGIS), de allí que de la superficie de 210.678,88 ha., la franja de bosque ocupa un total de 11.776,58 ha (5,59% del ADI y 0,23% de las 4.330.00 ha del área total del estado Anzoátegui).

Estimaciones de Biomasa y Contenido de Carbono. La Tabla 1 muestra los resultados de las estimaciones de carbono orgánico del suelo (COS) en muestras tomadas cada 20 cm, desde la superficie hasta 1m de profundidad (Prof.) en las ocho (8) estaciones de muestreo a lo largo de la cuenca alta del río Tigre (Anzoátegui, Venezuela, cuyos valores varían entre estaciones). Mientras la tabla 2, resume las estimaciones de la biomasa tanto del compartimiento aéreo (BA), como de la biomasa subterránea (BS), a partir de los cuales se estimaron los correspondientes contenidos de carbono (CBA y CBS) expresados en t/ha en las ocho (8) estaciones de campo del segmento de la cuenca alta de río Tigre, que conforma el área de interés (ADI) para la exploración inicial del secuestro de carbono.

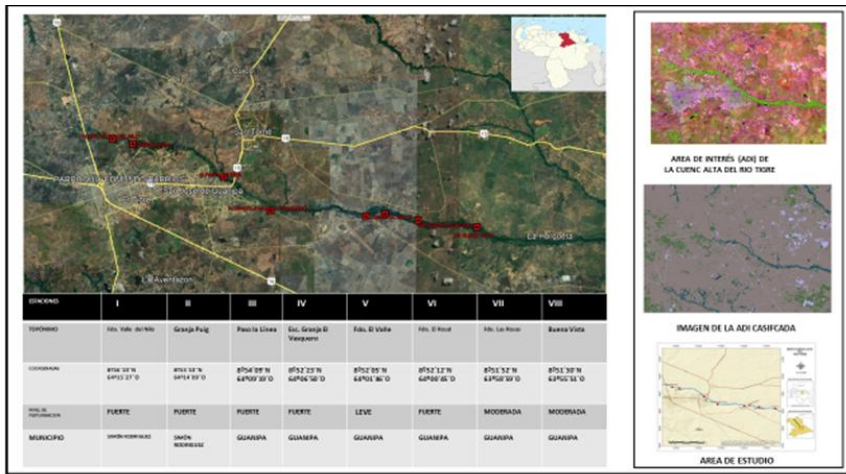


Figura 2. Imagen satelital (Google Earth) en color real mostrando los ocho (8) sitios de muestreo de campo la cuenca alta del río Tigré. Abajo, tabla resumen de los sitios muestreados. A la derecha. Extremo superior: Área de Interés (ADI) para exploración con la imagen LandSat 9, sensor OLI, combinación de bandas (6,5,4). Intermedia: imagen del ADI clasificada para cuantificar la biomasa de bosque como una de las clases. Inferior: mapa de la posición relativa del Área de Estudio (Peña-Colmenarez y Gordon-Colón, 2019).

Tabla 1. Carbono orgánico del suelo en muestras tomadas cada 20 cm, desde la superficie hasta 1m de profundidad (Prof.) en las ocho (8) estaciones de muestreo a lo largo de la cuenca alta del río Tigré (Anzoátegui, Venezuela).

B. Prof. (cm)	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	Promedio	±DS
0-20	259,56	81,6	156	299,04	275,72	59,57	90,09	273,9	186,94	100,67
20-40	116,26	18,75	141,31	224,53	54,28	95,38	108,53	120,34	109,92	60,82
40-60	52,63	59,78	59,97	14,15	30,37	34,47	34,47	40,04	40,74	15,89
60-80	18,6	15,98	26,68	12,37	46,94	19,47	19,47	24,4	22,99	10,66
80-100	16,5	67,93	21,44	-	-	12,81	11,25	-	25,99	23,77
COT (t/ha)*	463,55	244,04	405,4	550,09	407,31	221,7	263,81	458,68	376,82	119,80

*A 80 cm o 1-m de profundidad del suelo

Al multiplicar el valor de superficie ocupada por el bosque en el ADI por el valor promedio estimado de 562,30 tC/ha resultó un total de 6.621.970,93 tC/ha en el ADI, distribuido en 2.131.612,44 tC (32.19%) para el COBA, 288.717,93 (4.36%) tC para el COBS y 4.201.640,86 (63,45%) tC para el COS (Figura 3). Estos resultados ponen en evidencia el

potencial de este bosque para prestar el servicio ecosistémico para el secuestro de carbono, el cual sería la base para diseñar e implementar políticas de mitigación sobre el contenido de CO₂ en la atmósfera, basados en el manejo sustentable, conservación y restauración de estos bosques en el inmenso cinturón del espacio geográfico nacional que ellos ocupan.

Tabla 2. Resumen de los valores de biomasa aérea (BA) y subterránea (BS) y de estimaciones de carbono en cada compartimiento (COBA y COBS), el carbono orgánico total del suelo (COS) y el COTOTAL del sistema sólo con datos de *Mauritia flexuosa* (sin tomar en cuenta otros componentes de la biomasa total del ecosistema como otros árboles, plantas herbáceas, y necromasa) en las ocho (8) estaciones de muestreo a lo largo de la cuenca alta del río Tigre (Anzoátegui, Venezuela).

	BIOMASA AÉREA	BIOMASA SUBTERRÁNEA	COBA	COBS	BA +BS	COS	COTOTAL
ESTACIÓN	(BA) en t/ha	(BS) en t/ha	en t/ha	en t/ha	en t/ha	en t/ha	en t/ha
I	385,82	25,00	192,91	12,50	205,41	463,55	668,96
II	328,03	23,87	164,01	11,94	175,95	244,04	419,99
III	231,62	21,07	115,81	10,53	126,34	405,40	531,74
IV	352,48	24,47	176,24	12,24	188,48	550,09	738,57
V	364,89	24,76	182,44	12,38	194,82	407,31	602,13
VI	407,07	25,70	203,54	12,85	216,39	221,70	438,09
VII	517,81	27,81	258,91	13,91	272,82	263,81	536,63
VIII	308,03	23,35	154,01	11,68	165,69	458,68	624,37
PROMEDIO	361,97	24,50	180,98	12,25	193,24	376,82	562,30

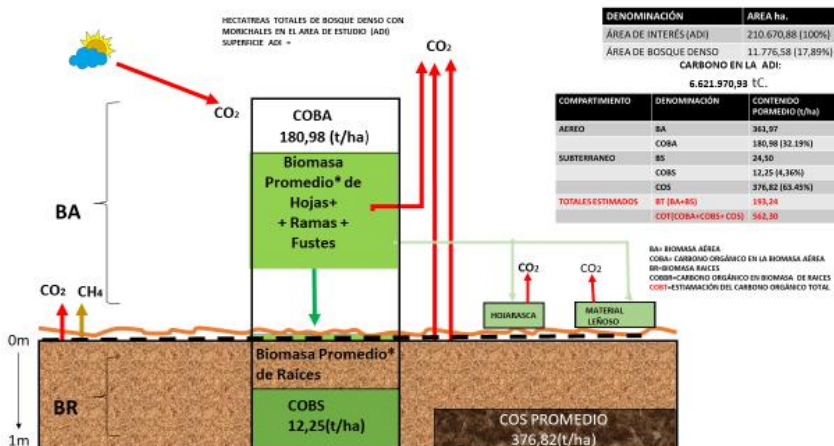


Figura 3. Esquema del ciclo de carbono con los valores estimados para cada compartimiento: Carbono de la biomasa aérea (COBA), biomasa subterránea (COBS) y orgánico del suelo (COS) en el bosque de morichal en t/ha. Fuente: Elaboración propia.

Propuesta exploratoria para estudiar las tasas de transferencias de carbono. La fase siguiente de la exploración, luego de afinar las estimaciones de cada reservorio de carbono orgánico en estos bosques, será la aproximación sucesiva de los procesos que definan la dinámica espacio temporal del ciclo del carbono en bosques de morichal. Una primera aproximación a este paso, se obtuvo del modelo de transferencia de carbono con solo dos compartimientos (Mitsch *y col.*, 2012), uno generalizado para registrar el carbono orgánico en la biomasa, así como la liberación de metano, producto de los procesos de descomposición en la fracción del ecosistema afectado por la lámina de agua del humedal, que representa en la zonación del continuo boscoso, el sitio donde se registra ese proceso. En la Figura 4 se esquematiza este modelo, la sección A muestra el diagrama de Forrester (1971) para el modelo, luego las dos ecuaciones diferenciales que lo formalizan y finalmente el gráfico del resultado de las simulaciones para 100 años corridas con el modelo en cuestión. Entre tanto, el aparte B de la figura muestra el esquema sobre el continuo del morichal, la zona donde sería más importante la metanogénesis dentro del ecosistema. Es de resaltar que, para los bosques subtropicales en Costa Rica, los autores del modelo, estimaron que existe una proporción de 5:1 de CO₂:CH₄ y de 55:1, CO₂:CH₄ en los resultados de las simulaciones de 100 años en su modelo.

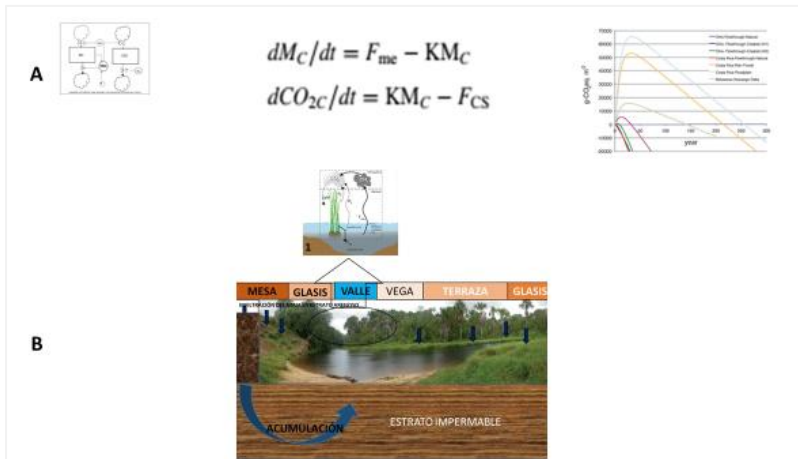


Figura 4. Modelo de simulación de dos compartimientos para determinar la dinámica del carbono en bosques asociados a un humedal. Fuente: Modificado de Mitsch *y col.* (2013).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados preliminares de la exploración son promisorios para continuar la investigación y generar más conocimiento útil para el diseño de políticas tanto de conservación y manejo sustentable de los bosques

riberños, como para la mitigación del CO₂, principal responsable del efecto de gases invernadero. La investigación planteada es válida en el marco nacional y también regional. Según la FAO (2016), el carbono del suelo representa el 25% del potencial de las soluciones climáticas naturales (potencial total, 23,8 Gt de CO₂ equivalente por año), de los cuales el 40% es la protección del carbono del suelo existente y el 60% es la reconstrucción de las reservas agotadas. El carbono del suelo comprende el 9% del potencial de mitigación de los bosques, el 72% para los humedales y el 47% para la agricultura y los pastizales. El carbono del suelo es importante para los esfuerzos de prevenir las emisiones de carbono a través del manejo adecuado de los ecosistemas terrestres, reducir el dióxido de carbono atmosférico y prestar servicios ecosistémicos, además de la mitigación del clima (Bossio *y col.*, 2020). Nuestras estimaciones apuntan en este sentido y evidencian aún más la importancia del manejo sustentable de estos ecosistemas. Mantener o aumentar las existencias de COS puede desempeñar un papel importante para abordar desafíos del CC, pero también la degradación de la tierra, la pérdida de biodiversidad y la seguridad alimentaria (IPCC, 2019). De igual forma, promover la conservación del COS como compartimiento clave en el secuestro de carbono es crucial para contribuir a lograr los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular, los ODS 2, 13 y 15 adoptados por las Naciones Unidas en 2015 (Fujisaki *y col.*, 2023). En concordancia con estos criterios, la investigación planteada está altamente ligada a las bases para la elaboración de políticas públicas locales, nacionales para la mitigación del CC por reducción significativa y continua del CO₂ atmosférico, mediante el secuestro controlado del carbono en los ecosistemas de bosque, extrapolable a toda la región Latinoamericana y caribeña, que permita avanzar para alcanzar tales objetivos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente trabajo expresamos nuestro profundo agradecimiento a los organizadores del V Simposio de Humedales: Especies y Ecosistemas en Peligro, por la oportunidad de dar a conocer esta línea de investigación que consideramos de gran importancia para el país, pero también, por permitirnos el honor de contribuir al merecido homenaje y reconocimiento al Dr. Valois González Boscán.

LITERATURA CITADA

- Bossio, D.A., S. C. Cook-Patton, S. P. W. Ellis, J. Fargione, J. Sanderman, P. Smith, S. Wood, R. J. Zomer, M. von Unger, I.M Emmer y B. W. Griscom. 2020. The role of soil carbon in natural climate solutions. *Nature Sustainability*. Analysis. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0491-z>. Consultada el 18/02/2023.
- Chave, J., C. Andalo, S. Brown, M. A. Cairns, J. Q. Chambers, D. Eamus, H. Fölster, F. Fromard, N. Higuchi, T. Kira, J.-P. Lescure, B. W. Nelson, H. Ogawa, H. Puig,

- B. Riéra, T. Yamakura. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145: 87–99.
- Chave, J., M. Rejou - Mechain, A. Bürquez, E. Chidumayo, M. S. Colgan, W. B. C. Delitti, A. Duque, T. Eid, P. M. Fearnside, R. C. Goodman, M. Henry, A. Martínez - Yrizar, W. A. Mugasha, H. C. Mullerlandau, M. Mencuccini, B. W. Nelson, A. Ngomanda, E. M. Nogueira, E. Ortiz-Malavassi, R. Péliissier, P. Ploton, C. M. Ryan, J.G. Saldarriaga y G. Vieilledent. 2014. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, doi: 10.1111/gcb.12629.
- FAO. 2016. *Forest Global Resources Assessment in 2015. How is the World's forest changing?* Second Edition. Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO 2nd. Edition. ISBN 978-92-5-109283-5. 44pp.
- Forrester, J. (1971). Counter intuitive behavior of social systems. *Technology Review* 73(3): 52–68.
- Fujisaki, K., T. Chevalier, A. Bispo, J-B. Laurent, F. Thevenin, L. Chapuis-Lardy, R. Cardinael, C. Le Bas, V. Freycon, F. Bénédet, V. Blanfort, M. Brossard, M. Tella y J. Demenois. 2023. Semantics about soil organic carbon storage: DATA4C+, a comprehensive thesaurus and classification management practices in agriculture and forestry. *SOIL* 9:89–100.
- González-B V y A. Rial. 2013. Terminología y tipos de agrupación de *Mauritia flexuosa* según el paisaje. Capítulo 4. En: Lasso CA, Rial A, González- B V (Eds.), VII. Morichales y canangunchales de la Orinoquia y Amazonia: Colombia - Venezuela. Parte I. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander, Bogotá, D. C., Colombia, pp. 75- 83.
- Goodman R. C., O. L. Phillips, D. del Castillo Torres, L. Freitas, S. Tapia Cortese, A. Monteagudo, T. y R. Baker. 2013. Amazon palm biomass and allometry. *Forest Ecology and Management* 310: 994-1004.
- Hernández, M.E. 2010. Suelos de humedales como sumideros de carbono y fuentes de metano. *Terra Latinoamericana* 28: 139-147.
- Honorio, C.E.N. y T. R. Baker. 2010. *Manual para el Monitoreo del carbono en bosques amazónicos*. Ed. Economic and Social Research Council (ESRC), Department for International Development (DfID). Iquitos, Perú. 54pp.
- IPCC. 2019. Calentamiento global de 1,5 °C. Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5°, con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza. ISBN 978-92-9169-351-1. 26pp.
- Nascimento, H. y W. Laurance. 2002. Total aboveground biomass in central Amazonian rainforests: a landscape-scale study. *Forest Ecology and Management* 168: 311-321.
- Mitsch, W., B. Bernal. AN. Nahlik, Ü. Mander, L. Zhang, C. J. Anderson, S. E. Jorgensen, H. Brix. 2012. Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape Ecology* 28(4):583–597.
- Pearson, T., S. Walker, S. Brown. 2005. Sourcebook for Land Use, Land-Use Change and Forestry Projects. Winrock International and World Bank BioCarbon Fund. <https://winrock.org/>. Consultado: 20/02/2023.
- Peña-Colmenarez, C. y E. Gordon-Colón. 2019. Morichal de la Cuenca Alta del río Tigre (Anzoátegui, Venezuela): Aguas, suelos y vegetación. *Acta Biol. Venez.* 39(2):137-228.