

Revista Cubana de Ciencias Forestales

Volumen 14, 2026, enero-diciembre



Artículo original

Cuantificación del carbono almacenado en dos bosques de la Reserva de la Biosfera Sierra del Rosario (Cuba): Implicaciones para esquemas de pago por servicios ambientales

Quantification of carbon stored in two forests of the Sierra del Rosario Biosphere Reserve (Cuba): Implications for payment schemes for environmental services

Quantificação do carbono armazenado em duas florestas da Reserva da Biosfera da Sierra del Rosario (Cuba): Implicações para sistemas de pagamento por serviços ambientais

Shira Fernández Riquenes^{1*} , Rogelio Sotolongo Sospedra² 
Jorge Luis Zamora Martín¹ , Víctor Gutiérrez Gómez³ 

¹Estación Ecológica de la Reserva de la Biosfera Sierra del Rosario. Cuba.

²Universidad de Pinar del Río "Hermanos Saíz Montes de Oca". Pinar del Río, Cuba.

³Centro Nacional de Áreas Protegidas. Cuba.

*Autor para la correspondencia: shirafernandez02@gmail.com

Recibido: 14/04/2026.

Aprobado: 23/04/2026.

RESUMEN

Los bosques tropicales almacenan cerca del 25% del carbono terrestre global, lo que los convierte en actores centrales para la mitigación del cambio climático y en potenciales beneficiarios de Pagos por Servicios Ambientales. Esta investigación cuantificó el carbono almacenado en la biomasa aérea y subterránea de dos bosques con distinto



estado sucesional. El Mulo con 280 ha, en regeneración, y Las Peladas con 214 ha de bosque maduro en la Reserva de la Biosfera Sierra del Rosario, Cuba. Se establecieron nueve parcelas de 500 m², cinco en Las Peladas y cuatro en El Mulo. Se midió el diámetro a 1,30 m $\geq$ 5 cm y la altura total de todos los individuos arbóreos. La biomasa se estimó mediante una ecuación alométrica que incorpora diámetro y altura. El carbono almacenado estimado fue de 34,65 tCO₂ ha⁻¹ en El Mulo y 104,32 tCO₂ ha⁻¹ en Las Peladas. *Prunus occidentalis* Sw. dominó en El Mulo con el 37,2% del carbono total, mientras que *Matayba oppositifolia* (A. Rich.) Britton fue clave en Las Peladas con el 22,4%. La valoración económica bajo un rango conservador, de 10–20 USD tCO₂⁻¹, arrojó un valor potencial por parcela de hasta 1 521 USD para Las Peladas, equivalente a un stock histórico de 44 000–88 000 USD para toda el área núcleo. Se confirma el valor de los bosques maduros en la captura de carbono y se recomienda manejo diferenciado, monitoreo anual de captura y certificación bajo estándares voluntarios para acceder a mercados de carbono.

Palabras clave: biomasa forestal; ecuaciones alométricas; mercados de carbono; PSA; bosque tropical.

ABSTRACT

Tropical forests store approximately 25% of global terrestrial carbon, making them central actors in climate change mitigation and potential beneficiaries of Payments for Ecosystem Services. This research quantified the carbon stored in aboveground and belowground biomass of two forests at different successional stages: El Mulo, a regenerating forest, and Las Peladas a mature forest, both located in the Sierra del Rosario Biosphere Reserve, Cuba. Nine 500 m² plots were established, five in Las Peladas and four in El Mulo. Diameter at 1.30 m $\geq$ 5 cm and total height were measured for all tree individuals. Biomass was estimated using an allometric equation incorporating diameter and height. Estimated stored carbon was 34.65 t CO₂ ha⁻¹ in El Mulo and 104.32 tCO₂ ha⁻¹ in Las Peladas. dominated in El Mulo with 37.2% of total carbon, while *Matayba oppositifolia* (A. Rich.) Britton was key in Las Peladas with 22.4%. Economic valuation under a conservative range of 10–20 USD tCO₂⁻¹ yielded a potential value per plot of up to 1,521 USD for Las Peladas, equivalent to a historical stock of 44,000–



88,000 USD for the entire core area. The value of mature forests for carbon sequestration is confirmed, and differentiated management, annual monitoring of sequestration, and certification under voluntary standards are recommended to access carbon markets.

Keywords: forest biomass; allometric equations; carbon markets; PES; tropical forest.

RESUMO

As florestas tropicais armazenam cerca de 25% do carbono terrestre global, tornando-se atores centrais para a mitigação das mudanças climáticas e potenciais beneficiários de Pagamentos por Serviços Ambientais. Esta pesquisa quantificou o carbono armazenado na biomassa aérea e subterrânea de duas florestas em diferentes estágios sucessionais: El Mulo com 280 ha, em regeneração, e Las Peladas de floresta madura na Reserva da Biosfera Sierra del Rosario, Cuba. Nove parcelas de 500 m² foram estabelecidas, cinco em Las Peladas e quatro em El Mulo. Mediu-se o diâmetro a 1,30 m $\geq$ 5 cm e a altura total de todos os indivíduos arbóreos. A biomassa foi estimada por meio de uma equação alométrica que incorpora diâmetro e altura. O carbono armazenado estimado foi de 34,65 t CO₂ ha⁻¹ em El Mulo e 104,32 t CO₂ ha⁻¹ em Las Peladas. *Prunus occidentalis* Sw. dominou em El Mulo com 37,2% do carbono total, enquanto *Matayba oppositifolia* (A. Rich.) Britton foi chave em Las Peladas com 22,4%. A valoração econômica sob uma faixa conservadora de 10–20 USD t CO₂⁻¹ resultou em um valor potencial por parcela de até 1.521 USD para Las Peladas, equivalente a um estoque histórico de 44.000–88.000 USD para toda a área núcleo. Confirma-se o valor das florestas maduras na captura de carbono e recomenda-se manejo diferenciado, monitoramento anual da captura e certificação sob padrões voluntários para acessar mercados de carbono.

Palavras-chave: biomassa florestal; equações alométricas; mercados de carbono; PSA; floresta tropical.



INTRODUCCIÓN

Los bosques tropicales almacenan aproximadamente el 25% del carbono terrestre global y son responsables de cerca del 40% del sumidero terrestre de carbono (Pan *et al.*, 2011). Esta capacidad los convierte en actores centrales de las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC) del Acuerdo de París (IPCC, 2023). Sin embargo, la deforestación y la degradación forestal continúan reduciendo este sumidero crítico (FAO, 2020).

De los múltiples bienes y servicios que proveen los bosques, la captura de CO₂ se ha convertido en uno de los más importantes desde una perspectiva de mitigación global. En un ecosistema forestal, los flujos y almacenes de carbono incluyen el follaje, las ramas, las raíces, el tronco, los desechos y el humus estable. Estimar la producción de biomasa y el carbono capturado por especie permite conocer el valor de este servicio ambiental y su relevancia como estrategia para reducir la concentración de CO₂ atmosférico (Brown, 1997).

En este contexto, los Pagos por Servicios Ambientales (PSA) y los mercados voluntarios de carbono han surgido como mecanismos de financiamiento para la conservación y restauración de ecosistemas forestales (Sedjo y Sohngen, 2012).

En Cuba, el reporte de secuestro de carbono en el sector forestal (INAF, 2017) está asociado principalmente a las existencias de madera en pie de bosques naturales y artificiales bajo manejo. Sin embargo, son escasos los estudios que integren composición florística, biomasa por especie, carbono almacenado y valoración económica en reservas de biosfera.

La Reserva de la Biosfera Sierra del Rosario, declarada por la UNESCO el 15 de febrero de 1985 como la primera de su tipo en Cuba, alberga diversas áreas núcleo, entre ellas las Reservas Naturales El Mulo y Las Peladas. Estas áreas representan los ecosistemas mejor conservados de la reserva según el Plan de Manejo 2020-2025, aunque presentan historiales de disturbio contrastantes: El Mulo es un bosque secundario en regeneración activa (extracción selectiva hasta los años 80), mientras que Las Peladas es un bosque maduro sin intervención significativa en más de 60 años.



Comprender la capacidad de estos sistemas para almacenar carbono y el rol diferencial de las especies arbóreas es indispensable para diseñar esquemas de PSA efectivos y para orientar estrategias de manejo diferenciado por estado sucesional. En el estudio se analiza cómo varía el almacenamiento de carbono entre un bosque maduro y uno en regeneración en la Reserva de la Biosfera Sierra del Rosario, y qué especies arbóreas contribuyen desproporcionadamente a dicho servicio. Se parte de la hipótesis siguiente: la variación espacial en la cantidad de carbono almacenado está determinada principalmente por la abundancia de un grupo reducido de especies arbóreas dominantes, y dicha dominancia funcional es mayor en el bosque en regeneración que en el bosque maduro. El objetivo del estudio fue cuantificar el carbono almacenado en las reservas naturales El Mulo y Las Peladas para estimar su valor económico potencial bajo un escenario de pago por servicios ambientales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se desarrolló en los sitios El Mulo con 280 ha y Las Peladas con 214 ha, ubicados en la provincia de Artemisa, Cuba. Ambos sitios presentan clima tropical húmedo, con temperatura media anual de 24 °C y precipitación media anual de 1 800 mm, con una estación seca de noviembre a abril. Los suelos son ferralíticos rojos, con textura franco-arcillosa.

La vegetación corresponde a bosque semicaducifolio sobre serpentina en El Mulo y bosque siempreverde mesófilo en Las Peladas. El Mulo fue objeto de extracción selectiva de maderas preciosas hasta la década de 1980 y Las Peladas no ha sido intervenido en más de 60 años de acuerdo al plan de manejo 2020-2025.

En la Figura 1, se presenta el mapa de la reserva, la ubicación de los dos sitios y de los puntos de muestreo en cada uno.





Figura 1. - Mapa de la Reserva de la Biosfera Sierra del Rosario y ubicación de los sitios El Mulo y Las Peladas. Los puntos verdes claro indican la ubicación de las parcelas de muestreo

Fuente: Área Protegida de Recursos Manejados. Reserva de la Biosfera Sierra del Rosario

Muestreo

El muestreo se realizó en parcelas rectangulares de 500 m² (20 × 25 m). Las parcelas se distribuyeron de forma estratificada según las variaciones topográficas y de cobertura vegetal identificadas en cada sitio. Inicialmente, se seleccionaron cinco puntos en Las Peladas y cuatro en El Mulo sobre el mapa de la reserva, asignando coordenadas noroeste y un número identificativo a cada punto. En el terreno, se localizó cada parcela mediante GPS (± 3 m). Cuando la topografía impedía el establecimiento exacto, se reubicó la parcela en el lugar más similar posible y se registró la nueva ubicación. Se marcaron con pintura los árboles que coincidían con los vértices y los que limitaban cada lado.

Criterios de inclusión: se midieron todos los individuos arbóreos con diámetro a 1,30 m (DAP) ≥ 5 cm. No se incluyeron palmas, helechos arborescentes ni individuos muertos en pie.

Mediciones dasométricas y florísticas

Cada individuo fue identificado taxonómicamente mediante claves especializadas y comparación con ejemplares de herbario. Por cada individuo se registró el DAP con cinta diamétrica de precisión 0,1 cm, la altura total (H) con hipsómetro Vertex con precisión



0,5 m o en parcelas de dosel denso, con clinómetro y cinta métrica. Para cumplir con la metodología, las mediciones fueron convertidas en pulgadas y pies.

Se calculó el Índice de Valor de Importancia Ecológica (IVIE) formulado por Curtis y McIntosh (1951) para cada especie, a partir de la suma de los parámetros de estructura horizontal: abundancia relativa, frecuencia relativa y dominancia relativa, expresada por el área basal. Las especies con IVIE > 0,5 se consideraron ecológicamente importantes.

Estimación de la biomasa y el carbono almacenado

La biomasa aérea se estimó siguiendo la metodología del Planetary Carbon Standard, PSC (2023). Los cálculos se hicieron mediante las siguientes fórmulas:

Biomasa aérea (AGB):

$$AGB = 0,25 * D^2 * H$$

Donde:

- D= D_{1,30} en pulgadas
- H = altura total en pies

Biomasa subterránea (BGB): Se estimó como el 20% de la AGB, conforme la recomendación del IPCC (2006) para bosques tropicales:

$$BGB = 0,20 \times AGB$$

$$\text{Biomasa total (TB): } TB = AGB + BGB$$

$$\text{Peso seco total (PD)} = TB \times 0,725$$

$$\text{Carbono total (CT)} = PD \times 0,5$$

$$\text{Peso de CO}_2 = CT \times 3,67$$

Todos los valores se expresaron en toneladas por hectárea (t ha⁻¹) y por parcela.

Valoración económica del CO₂ almacenado

Se utilizó un rango de precios de 10 a 20 USD por tonelada de CO₂ (tCO₂), basado en promedios del mercado voluntario de carbono para proyectos de restauración y



conservación forestal en Latinoamérica (Ecosystem Marketplace, 2023). Este rango es conservador, ya que proyectos con certificación de alta calidad (Verra, Gold Standard) pueden alcanzar precios de USD 25–40 tCO₂.

Para cada parcela se calculó:

$$\text{Valor (USD)} = \text{CO}_2 \text{ almacenado (tCO}_2\text{)} \times \text{Precio (USD tCO}_2\text{)}$$

Nota importante: este cálculo representa el valor del stock histórico de carbono acumulado durante la vida de los árboles, no la captura anual. El stock histórico sirve como indicador del potencial del sitio, pero los esquemas de PSA y los mercados de carbono generalmente pagan por la captura anual neta, incremento de biomasa por año. Para acceder a esos mercados se requiere monitoreo anual mediante parcelas permanentes.

Análisis estadístico

Prueba T de Student para muestras independientes, previa verificación de normalidad con Shapiro-Wilk y homogeneidad de varianzas con Levene, a fin de comparar las medias de carbono entre El Mulo y Las Peladas.

Coefficiente de correlación de Spearman entre la abundancia de la especie dominante y el carbono total por parcela. El nivel de significación se fijó en $\alpha = 0,05$. Los análisis se realizaron con el software InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2020).

RESULTADOS

Caracterización general de los sitios

En la tabla 1, se presenta la caracterización general de los dos sitios evaluados. La diversidad de especies expresada por el índice de Shannon-Wiener (H') es ligeramente mayor en Las Peladas (1,38 vs. 1,24), aunque la equitatividad (J') es similar (0,85 vs. 0,83). El número de especies es notablemente mayor en Las Peladas (41) que en El Mulo (32), a pesar de que El Mulo presenta un mayor número total de individuos (881 vs. 522). El



área basal total y el volumen total son considerablemente superiores en Las Peladas, reflejando su condición de bosque maduro con árboles de mayor porte (Tabla 1).

Tabla 1. - Caracterización de la diversidad de especies por sitio

Parámetro	El Mulo	Las Peladas
Total de individuos	881	522
Total de especies	32	41
Shannon H'	1,24	1,38
Shannon J'	0,83	0,85
Área basal total (m ²)	5,12	24,87
Volumen total (m ³)	68,19	205,31
Área basal (m ² ha-1)	25,6	341,0
Volumen (m ³ ha-1)	99,48	821,0

Composición florística e Índice de Valor de Importancia Ecológica (IVIE)

En las tablas 2 y 3, se presentan los listados florísticos de cada zona de estudio, así como la contribución ecológica de cada especie según su IVIE (Tablas 2 y 3).

Tabla 2. - Contribución por especie según IVIE en El Mulo (IVIE > 0,5)

Nombre científico	IVIE
<i>Prunus occidentalis</i> Sw.	1,5966
<i>Hibiscus costatus</i> A. Rich.	1,3220
<i>Dendropanax arboreus</i> (L.) Decne. & Planch.	1,1459
<i>Syzygium jambos</i> (L.) Alston	1,1296
<i>Guarea guidonia</i> (L.) Sleumer	1,0947
<i>Palicourea crocea</i> (Sw.) Roem. & Schult.	1,0920
<i>Trophis racemosa</i> (L.) Urb.	1,0814
<i>Trichilia havanensis</i> Jacq.	1,0741
<i>Cinnamomum verum</i> J.Presl.	1,0636
<i>Casearia sylvestris</i> subsp. <i>myricoides</i> (Griseb.) J. E. Gut.	1,0263
<i>Erythroxylum areolatum</i> L.	1,0198
<i>Oxandra lanceolata</i> (Sw.) Baill.	0,8589
<i>Nectandra coriacea</i> (Sw.) Griseb.	0,8059
<i>Sideroxylon foetidissimum</i> Jacq. subsp. <i>foetidissimum</i>	0,7859
<i>Pisonia aculeata</i> L.	0,7822
<i>Licaria triandra</i> (Sw.) Kosterm.	0,5241



En El Mulo, 16 especies presentan con IVIE > 0,5, lo que indica una distribución de la importancia ecológica en un número relativamente alto de especies, aunque con una clara dominancia de *Prunus occidentalis* (el valor más alto).

Tabla 3. - Contribución por especie según IVIE en Las Peladas (IVIE > 0,5)

Nombre científico	IVIE
<i>Matayba oppositifolia</i> (A. Rich.) Britton	1,170
<i>Rondeletia odorata</i> Jacq. subsp. <i>odorata</i>	1,074
<i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg.	0,887
<i>Erythroxylum areolatum</i> L.	0,857
<i>Cyathea arborea</i> (L.) Sm.	0,852
<i>Clusia rosea</i> Jacq.	0,848
<i>Coccoloba uvifera</i> L.	0,687
<i>Chrysophyllum oliviforme</i> L. subsp. <i>oliviforme</i>	0,673
<i>Genipa americana</i> L.	0,666
<i>Calophyllum antillanum</i> Britton	0,657
<i>Syzygium jambos</i> (L.) Alston	0,654
<i>Sideroxylon foetidissimum</i> Jacq. subsp. <i>foetidissimum</i>	0,652
<i>Byrsonima lucida</i> (Mill.) DC.	0,631

En Las Peladas, 13 especies superaron el umbral de IVIE > 0,5. A diferencia de El Mulo, los valores de IVIE son más equilibrados entre las especies dominantes, sin una sola especie que duplique el valor de la segunda.

Contribución por especie al almacenamiento de CO₂

Sitio El Mulo: En la figura 2 se presentan las especies que más contribuyen al almacenamiento de CO₂, más de 1,0 tCO₂. *Prunus occidentalis* destaca con 12,90 tCO₂, lo que representa el 37,2% del carbono total del sitio de 34,65 tCO₂ ha⁻¹. Les siguen *Hibiscus costatus* con 3,87 tCO₂ y *Dendropanax arboreus* con 3,32 tCO₂. Se resaltan las especies que también se encuentran entre las más importantes según el IVIE (Figura 2).



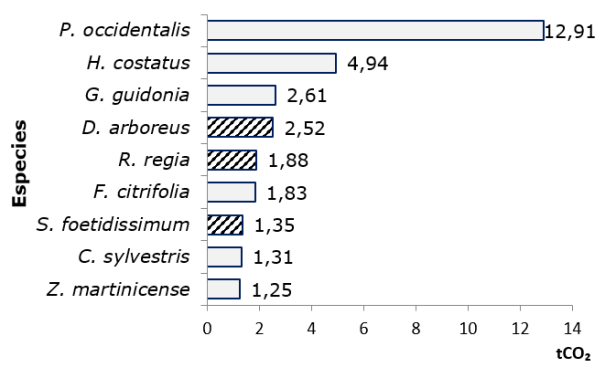


Figura 2. - Valor en tCO₂ (> 1,00) por especie en El Mulo

Sitio Las Peladas: en la figura 3, se muestran las especies con mayor almacenamiento de CO₂. *Matayba oppositifolia* acumula 23,41 tCO₂, 22,4% del total del sitio de 104,32 tCO₂ ha⁻¹. Otras especies importantes son *Pithecellobium* spp., con 8,56 tCO₂, *Cojoba arborea* con 7,23 tCO₂ y *Casearia laetioides* con 6,98 tCO₂. A diferencia de El Mulo, la distribución del carbono es más equitativa; al menos ocho especies superan las 5 tCO₂ (Figura 3).

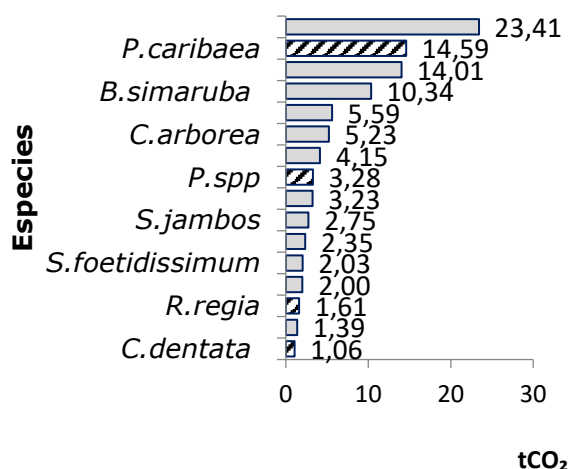


Figura 3. - Valor en tCO₂ (> 1,00) por especie en Las Peladas

Biomasa total por especie

El Mulo: La biomasa total (TB) promedio fue de 9,70 t ha⁻¹, *Prunus occidentalis* aportó 9,702 t ha⁻¹, valor muy similar a la media del sitio, lo que refleja su dominancia. La especie con menor biomasa fue *Trichostigma octandrum* con 0,00018 t ha⁻¹.



Las Peladas: La biomasa total promedio fue de 17,59 t ha⁻¹, *Matayba oppositifolia* alcanzó 17,597 t ha⁻¹, también muy cercana a la media del sitio. La especie con menor biomasa fue *Amyris balsamifera* con 0,0073 t ha⁻¹.

Carbono almacenado por sitio

En la tabla 4, se presentan los descriptivos estadísticos del carbono almacenado por sitio

Tabla 4. - Resultados de la estimación del carbono almacenado en los sitios El Mulo y Las Peladas de la Reserva de Biosfera Sierra del Rosario

Sitio	Media tCO ₂ ha ⁻¹	Desviación Estándar	IC 95%
El Mulo	34,65	5,82	28,1 – 41,2
Las Peladas	104,32	13,45	89,4 – 119,2

Comparación estadística

La prueba T de Student mostró una diferencia estadísticamente significativa entre ambos sitios (T = 8,94; gl = 7; p < 0,001). La correlación de Spearman entre la abundancia de la especie dominante y el carbono total por parcela fue alta en El Mulo (r = 0,89; p = 0,02) y moderada en Las Peladas (r = 0,62; p = 0,09), lo que apoya la hipótesis de una mayor dominancia en el bosque en regeneración.

Estimación de las compensaciones económicas potenciales

En las tablas 5 y 6, se presentan los valores monetarios por parcela bajo los tres escenarios de precio, 10, 15 y 20 USD por tCO₂. Se usó un rango conservador de 10 a 20 USD por tonelada de CO₂.

Tabla 5. - Compensación económica potencial en El Mulo (stock histórico)

Parcela	Precio bajo (\$10)	Precio medio (\$15)	Precio alto (\$20)	Total por parcela
P1	77,65	116,47	155,30	349,42
P2	47,51	71,27	95,02	213,80
P3	106,20	159,30	212,40	477,89
P4	115,18	172,77	230,36	518,32
Total	346,54	519,81	693,08	1 559,44



Tabla 6. - Compensación económica potencial en Las Peladas (stock histórico)

Parcela	Precio bajo (\$10)	Precio medio (\$15)	Precio alto (\$20)	Total por parcela
P1	235,23	352,85	470,47	1 058,55
P2	332,15	498,22	664,30	1 494,67
P3	33,51	50,27	67,03	150,81
P4	338,12	507,18	676,24	1 521,54
P5	104,28	156,42	208,56	469,26
Total	1 043,29	1 564,94	2 086,58	4 694,81

La estimación preliminar para toda el área núcleo, considerando un precio en USD 10-20 tCO₂⁻¹ representaría:

- Las Peladas (214 ha): USD 44 000 – 88 000.
- El Mulo (280 ha): USD 31 000 – 62 000.

Estos montos representan el valor del carbono históricamente almacenado, no la captura anual. En los mercados de carbono y esquemas de PSA, lo que se paga es el incremento anual neto de biomasa (secuestro anual). Para acceder a esos pagos, es indispensable establecer un sistema de monitoreo anual con parcelas permanentes. Los valores aquí presentados sirven como línea base del potencial del sitio.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en las zonas núcleo El Mulo y Las Peladas no solo cuantifican el servicio ecosistémico de almacenamiento de carbono, sino que también aportan evidencia empírica para abordar debates centrales en la ecología forestal tropical contemporánea: la relación entre diversidad y funcionamiento, la desarticulación entre recuperación florística y funcional y las implicaciones para los esquemas de PSA.

Uno de los debates más actuales gira en torno a qué factor es más determinante para el almacenamiento de carbono: la identidad de las especies dominantes o la diversidad numérica. Liang *et al.* (2016) demostraron una relación positiva y consistente entre la riqueza de especies y la productividad forestal a escala planetaria. Por otro lado, Poorter *et al.* (2016) propusieron que la biomasa aérea está determinada por múltiples factores, incluyendo la riqueza de especies, la estructura del bosque y variables ambientales, y



que en bosques secundarios la identidad de las especies pioneras de larga vida puede ser más importante que la diversidad *per se*.

Los datos de esta investigación ofrecen una perspectiva que integra ambas posturas a lo largo de un gradiente sucesional:

El Mulo (bosque en regeneración): Presenta una marcada hiperdominancia funcional. Una sola especie, *Prunus occidentalis*, concentra más de un tercio del carbono total del sitio (37,2%). Este patrón refleja lo señalado por Fauset *et al.* (2015) sobre la "hiperdominancia" en el ciclo del carbono de bosques amazónicos, y es consistente con la idea de que, en bosques secundarios tempranos, unas pocas especies de rápido crecimiento capitalizan el almacenamiento de carbono.

Las Peladas (bosque maduro): aunque *Matayba oppositifolia* es la especie dominante (22,4% del carbono), existen al menos ocho especies con DAP superior a 20 cm y cinco especies con alturas superiores a 10 m. La comunidad es más diversa y equitativa, y la productividad total (104 tCO₂ ha⁻¹) es tres veces superior a la de El Mulo. Este patrón es coherente con los hallazgos de Liang *et al.* (2016) y con la hipótesis de complementariedad de nichos: en bosques maduros, una mayor diversidad permite un uso más completo de los recursos y, por tanto, un mayor almacenamiento de carbono.

Recuperación de la composición florística vs. recuperación del stock de carbono

Los datos muestran claramente que la composición florística se recupera más rápidamente que el stock de carbono. El Mulo, con 32 especies (78% de las 41 especies presentes en Las Peladas), ya ha alcanzado una diversidad florística alta, probablemente gracias a la lluvia de semillas desde fragmentos de bosque maduro cercanos. Sin embargo, su stock de carbono (34,65 tCO₂ ha⁻¹) es apenas el 33,2% del stock de Las Peladas (104,32 tCO₂ ha⁻¹).

Este desacople entre recuperación florística y funcional es consistente con los estudios de sucesión a largo plazo en el Neotrópico (Rozendaal *et al.*, 2019). Mientras que la dispersión de semillas y la regeneración pueden restablecer rápidamente la presencia de muchas especies típicas en 20-40 años, se necesitan décadas o siglos (80-200 años) para



que estos individuos alcancen los diámetros y alturas necesarios para igualar las reservas de carbono de un bosque maduro.

Los valores de almacenamiento de CO₂ obtenidos son consistentes con resultados de estudios realizados en contextos ecológicos similares. Perea-Ardila *et al.* (2021), en Colombia en bosques altoandinos conservados, reportaron un almacenamiento promedio de 134,3 tCO₂ ha⁻¹. Chave *et al.* (2014) y Poorter *et al.* (2016) en Costa Rica y Panamá en bosques tropicales húmedos maduros reportan valores de 100-120 tCO₂ ha⁻¹, en ambos casos bastante similares a los de Las Peladas. Esto indica que el bosque maduro de Sierra del Rosario es representativo de bosques tropicales húmedos bien conservados de la región.

En Cuba, Ramírez-López y Chagna-Ávila (2019), en plantaciones de *Eucalyptus grandis*, obtuvieron valores de 100-150 tCO₂ ha⁻¹ para plantaciones maduras y 30-60 tCO₂ ha⁻¹ para plantaciones jóvenes. Las Peladas (104 tCO₂ ha⁻¹) son equivalentes a una plantación madura, mientras que El Mulo, 34,65 tCO₂ ha⁻¹, es equivalente a una plantación joven. Este paralelismo es notable y valida la interpretación del estado sucesional de ambos sitios, demostrando que los bosques naturales de la reserva, incluso en regeneración, tienen un potencial de almacenamiento comparable o superior a plantaciones comerciales.

Implicaciones para los esquemas de pago por servicios ambientales

La valoración económica realizada bajo un rango conservador, 10-20 USD tCO₂⁻¹ arrojó montos por parcela de hasta 1 521 USD en Las Peladas. Extrapolado a toda el área núcleo, que son 214 ha, el stock histórico tendría un valor de USD 44 000-88 000 USD. Sin embargo, como se ha enfatizado, los mercados de carbono no pagan por el carbono ya almacenado, sino por el carbono adicional capturado anualmente como resultado de actividades de conservación o restauración.

Para que la Reserva Sierra del Rosario pueda acceder a estos mercados, se requieren varios pasos; entre estos, establecer parcelas permanentes de monitoreo para medir la captura anual neta. Una estimación conservadora para bosques secundarios neotropicales es de 3-5 tCO₂ ha⁻¹ año⁻¹ (Poorter *et al.*, 2016). Si Las Peladas capturara 5



tCO₂ ha⁻¹ año⁻¹, las 214 ha generarían 1 070 tCO₂ año⁻¹, equivalentes a USD 10 700-21 400 anuales USD.

Sería factible para el futuro del área protegida optar por la certificación bajo estándares internacionales (Verra, Gold Standard, Climate Action Reserve), esta aumenta el precio hasta 25-40 USD tCO₂⁻¹, pero requiere costos iniciales de verificación y monitoreo continuo. También incorporar el carbono del suelo en futuras valoraciones podría aumentar significativamente el valor total del servicio.

Otro aspecto a considerar puede ser diseñar un esquema de PSA diferenciado por estado sucesional: para El Mulo (regeneración), los PSA podrían financiar actividades de restauración activa de enriquecimiento con especies de valor ecológico y económico, mientras que para Las Peladas (maduro), los PSA deberían compensar los costos de oportunidad de no extraer madera de especies valiosas como *Swietenia mahogoni* y *Brya ebenus*.

CONCLUSIONES

El bosque maduro Las Peladas almacena tres veces más carbono con 104,32 tCO₂ ha⁻¹ que el bosque en regeneración El Mulo, 34,65 tCO₂ ha⁻¹.

El valor económico potencial del stock histórico de carbono en Las Peladas es de USD 44 000-88 000, a precios de 10-20 USD tCO₂⁻¹ y en El Mulo de USD 31 000-62 000.

Agradecimientos

Los autores agradecen al personal de la Estación Ecológica de la Reserva de la Biosfera Sierra del Rosario y al Centro Nacional de Áreas Protegidas de Cuba por su apoyo logístico en el trabajo de campo y por facilitar la información cartográfica.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BROWN, S., 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. *FAO Forestry Paper* [en línea], no. 134, Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/239974368_Estimating_Biomass_and_Biomass_Change_of_Tropical_Forests_A_Primer.
- CHAVE, J., RÉJOU-MÉCHAIN, M., BURQUEZ, A. y CHIDUMAYO, E., 2014. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, vol. 20, no. 10, pp. 3177-3190.
- CURTIS, J.T. y MCINTOSH, R.P., 1951. An upland forest continuum in the prairie-forest border region of Wisconsin. *Ecology*, vol. 32, no. 3, pp. 476-496.
- DI RIENZO, J.A., CASANOVES, F., BALZARINI, M.G., GONZALEZ, L., TABLADA, M. Y ROBLEDO, C.W. 2020. *InfoStat versión 2020*. [en línea] Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, Disponible en: <http://www.infostat.com.ar>.
- ECOSYSTEM MARKETPLACE, 2023. *State of the Voluntary Carbon Markets 2023* [en línea]. 2023. S.l.: Forest Trends Association. Disponible en: <https://www.ecosystemmarketplace.com/publications/state-of-the-voluntary-carbon-market-report-2023/>.
- FAUSET, S., JOHNSON, M.O., GLOOR, M., BAKER, T.R. y MONTEAGUDO, A., 2015. Hyperdominance in Amazonian forest carbon cycling. *Nature Communications* [en línea], vol. 6, Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25919449/>.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2020. *Global Forest Resources Assessment 2020* [en línea]. 2020. S.l.: FAO. Disponible en: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/9f24d451-2e56-4ae2-8a4a-1bc511f5e60e/content>.
- INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROFORESTALES, 2017. *Reporte de Carbono del GAF 2017*. 2017. S.l.: INAF.



- IPCC, 2006. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* [en línea]. Hayama, Japón: IGES. vol. 4. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>.
- IPCC, 2023. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis* [en línea]. Reino Unido: Cambridge University Press. Disponible en: <https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2021-the-physical-science-basis/415F29233B8BD19FB55F65E3DC67272B>.
- LIANG, J., CROWTHER, T.W., PICARD, N., WISER, S. y ZHOU, M., 2016. Positive biodiversity-productivity relationship predominant in global forests. *Science*, vol. 354, no. 6309,
- PAN, Y., BIRDSEY, R.A., FANG, J., HOUGHTON, R. y KAUPP, P.E., 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* [en línea], vol. 333, no. 6045, Disponible en: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1201609>.
- PEREA ARDILA, M.A., ANDRADE CASTAÑEDA, H.J. y SEGURA MADRIGAL, M.A., 2021. Estimación de Biomasa Aérea y Carbono con Teledetección en Bosques Alto-Andinos de Boyacá, Colombia. Estudio de caso: Santuario de Fauna y Flora Iguaque. *Revista Cartográfica* [en línea], no. 102, Disponible en: <https://www.revistasipgh.org/index.php/rcar/article/view/821>.
- POORTER, L., BONGERS, F., AIDE, T.M. y ALMEYDA ZAMBRANO, A.M., 2016. Biomass resilience of Neotropical secondary forests. *Nature*, vol. 530, no. 7589, pp. 211-214.
- RAMÍREZ LÓPEZ, J.L. y CHAGNA AVILA, E.J., 2019. Secuestro de carbono en la biomasa aérea de una plantación de *Eucalyptus grandis* W. Hill. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, vol. 7, no. 1, pp. 86-97.
- ROZENDAA, D.M.A., BONGERS, F., AIDE, T.M., ALVAREZ DÁVILA, E. y ASCARRUNZ, N., 2019. Biodiversity recovery of Neotropical secondary forests. *Science Advances* [en línea], vol. 5, no. 3, Disponible en: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aau3114>.



SEDJO, R. y SOHNGEN, B., 2012. Carbon sequestration in forests and soils. *Annual Review of Resource Economics* [en línea], vol. 4, Disponible en: <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-resource-083110-115941>.

Conflictos de intereses:

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Contribución de los autores:

Los autores han participado en la redacción del trabajo y análisis de los documentos.



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.

