

Valoración económica del manglar por el almacenamiento de carbono, Ciénaga Grande de Santa Marta*

Economic valuation of mangrove for the carbon storage in the Ciénaga Grande de Santa Marta

Arnold De la Peña
Cesar Augusto Rojas
Marlon De la Peña

Resumen: La Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) genera diferentes bienes y servicios ambientales, por ejemplo, sumidero de carbono, hábitat de flora y fauna, despensa de alimentos y materias primas, entre otros. Se presenta una aproximación a la cuantificación monetaria del servicio de almacenamiento de carbono, con el fin de establecer información base para las decisiones de su uso. Lo anterior se hizo con base en muestreo de campo de 15 árboles de manglar y en mediciones realizadas en cuatro estaciones de monitoreo de la CGSM (Caño Grande, Rinconada, Aguas Negras y Luna) por INVEMAR (2008). Para tal fin, se estimó la biomasa aérea total, las existencias de carbono y de dióxido de carbono equivalente (CO_2e) discriminada por especie y zona. Los resultados indican que en términos relativos el bosque de manglar de la CGSM puede almacenar entre 6,9 (la Luna) y 45,7 (Rinconada) t C ha^{-1} . La valoración monetaria se encuentran entre US\$ 87,76 y 591,41 $\text{t CO}_2\text{e ha}^{-1}$, según los precios pagados por el Banco Mundial, correspondiente a los Certificados de Emisiones Reducidas (CERs) forestales no permanentes. El valor monetario amplía la importancia de iniciar un proceso que permita incorporar estos beneficios económicos a los actuales mecanismos de mercado y contribuyan a los esfuerzos locales de conservación.

Palabras Clave: Manglar, almacenamiento de carbono, biomasa aérea, dióxido de carbono equivalente y valoración económica.

Abstract: The Cienaga Grande de Santa Marta (CGSM) Generate Different Environmental goods and services, for instance, carbon sink, habitat for flora and fauna, stocks of foods and raw materials, etc. This paper presents an attempt to value in monetary terms the service of carbon storage, with the aim to establish inputs

*Recibido el 28 de abril de 2010 – Aprobado el 15 de junio de 2010

for the decisions process of used. This paper presents an Attempt to Terms Monetary value in the service of carbon storage, with the AIM to ESTABLISH Decisions inputs for the process of used. The previous thing was done with base in field sampling of 15 trees of mangrove and in measurements realized in four stations of monitoring of the CGSM (Caño Grande, Rinconada, Aguas Negras y Luna) by INVEMAR (2008). The previous thing WAS done with basis in field sampling of 15 trees of mangrove and in Measurements made on-four stations of monitoring of the CGSM (Caño Grande, Rinconada, Aguas Negras and Moon) by INVEMAR (2008). For such aim, the estimates of total aerial biomass, the existence of carbon and the CO₂e (equivalent carbon dioxide) were accounted by species and zone in the CGSM. For Such aim, the Estimates of total aerial biomass, the carbon and the Existence of CO₂e (carbon dioxide equivalent) Were account by species and zone in the CGSM. The results showed that in relative terms the forests of mangrove of the CGSM could store between 6.9 at Luna and 45.7 in Rinconada of t C has⁻¹. That results in the relative Eichmann Terms of the mangrove forests of the CGSM Could store at Luna entre 6.9 and 45.7 t C in Rinconada of ^{you-1}. The monetary valuation is between US\$ 591.41 and 87.76 of t CO₂e ha⁻¹, according to the prices paid by non permanent forestry CERs paid by the World Bank. The Monetary Valuation is entre U.S. \$ 591.41 and 87.76 of t CO₂e ha⁻¹, According To the Price Paid by Paid non permanent forestry CERs by the World Bank. The monetary valuation contributes to extend the importance of starting a process that allows to incorporate these economic benefits to the actual mechanisms of market that helps the local efforts for conservation. The Monetary Valuation Contribute to extend the Importance of Starting a Process That Allows to Incorporate These Economic Benefits to the current market of Mechanisms That Helps the local going efforts for conservation.

Keywords: Mangrove forest, carbon storage, aboveground biomass, carbon dioxide equivalent and economic valuation. Mangrove forest, carbon storage, aboveground biomass, carbon dioxide equivalent and Economic Valuation.

Introducción

Los manglares vienen generado una amplia gama de servicios ecológicos fundamentales para el sustento de las actividades económicas desarrolladas en las zonas marinas y costeras. Un rasgo específico de estos servicios, es que actúan como defensa de perturbaciones naturales y antrópicas, tales como: inundaciones, tormentas, erosión costera, reducción de riberas, mantenimiento de la calidad del agua, regulación climática, entre otros. Los cuales a menudo son subvalorados o no se tiene en cuenta de manera explícita en la toma de decisiones, contribuyendo en muchos casos a la degradación e incluso a su destrucción. Así lo evidencia Valiela *et al.* (2001) quienes encontraron que al menos un 35% de los bosques de manglar, se están perdiendo desde comienzos del decenio de 1980 a una tasa anual del 2.1%, superando incluso, los índices de pérdida de las selvas tropicales y arrecifes de coral.

Para el caso de la CGSM, se ha perdido alrededor del 41% de su cobertura de manglar, debido principalmente a la interrupción del intercambio hídrico entre

el complejo lagunar y el mar y a la obstrucción del agua dulce proveniente del río Magdalena. Esto como consecuencia de la construcción de vías, diques, canales y bordos durante 1956 a 1970, además de otros eventos climáticos y antropogénicos ocurridos en el área (INVEMAR, 2008). No cabe duda que la alteración del equilibrio ecológico en la Ciénaga, hizo evidente la muerte de manglar, y con ello, la disminución de recursos, representada principalmente en las menores capturas de peces, moluscos y crustáceos por parte de las comunidades locales asentadas en el complejo estuarino. Lo anterior sin duda afectó socioeconómicamente a estos pobladores, pero en última instancia, afectó el bienestar general de la sociedad, debido a la pérdida de servicios globales como es el caso del servicio de almacenamiento de carbono por parte de este ecosistema.

Desde esta perspectiva los manglares de la CGSM, prestan un servicio ambiental al planeta con respecto a los llamados Gases con Efecto Invernadero (GEI). Debido a que a partir de un proceso complejo absorben el CO_2 mediante la fotosíntesis, fijando el carbono en su biomasa y liberando el oxígeno a través de un ciclo natural, donde también se benefician animales descomponedores que digieren los carbohidratos presentes en las hojas caídas, devolviendo parte del CO_2 presente en estas al aire. Esta función climática convierte a los manglares en grandes sumideros de carbono, que en gran medida influyen en la vida de otros organismos, así como a la sociedad en general. Por lo tanto, esta función se debe internalizar en el proceso de toma de decisiones y reconocer, como parte del interés de conservación mundial.

Ahora con mucha más razón, cuando los desafíos del cambio climático han despertado mayores esfuerzos y compromisos para combatir los efectos de la creciente deforestación y quema de combustibles fósiles, proveniente de las actividades económicas desarrolladas por el hombre, en el transcurso de la era industrial que afectan las condiciones climáticas globales. Que de acuerdo con Keeling *et al.* (2009) la concentración de CO_2 antes de la era industrial, se encontraba inalterada en forma natural durante miles de años en el orden 280 ppm (partes por millón de moléculas en el aire), en la actualidad esta cantidad ha sobrepasado los 380 ppm. Emitiéndose en este momento alrededor de 36.000 millones de toneladas de dióxido de carbono cada año, de las cuales 17.000 millones van a parar a la atmósfera, mientras que el resto son absorbidas por los sumideros naturales de la tierra y el océano. Es decir; aproximadamente 2 ppm se añaden a la atmosfera cada año (Sachs, 2008).

Con miras a este desafío mundial, el Protocolo de Kioto (PK) estableció los primeros mecanismos de mercado para incentivar las transacciones de CO_2 equivalente (CO_2e) Esto con el fin de reducir las emisiones gases con efecto invernadero, por parte de aquellos países (industrializados) responsables de las mayores emisiones. Lo anterior, se estableció a través de los esquemas de Comercio de Emisiones (CE); Aplicación Conjunta (AC) y el Mecanismo

de Desarrollo Limpio (MDL). En el primero, se faculta la compra y venta de los derechos de emisión otorgados a los países (industrializados) que hayan emitido gases de invernadero por debajo de la cuota pactada en el tratado. Mientras el segundo y tercer esquemas, cubren las transacciones de derechos de reducción, adquiridas por medio de proyectos que reduzcan, secuestren o almacenen gases con efecto invernadero (GEI). La diferencia entre AC y MDL, radica en el sitio donde se lleven a cabo los proyectos, si este se efectúa en países (industrializados) con compromisos de reducción de GEI, los créditos se otorgan en el marco del esquema AC. Mientras que los créditos otorgados a los proyectos de los países en vías de desarrollo, harán parte del esquema MDL. Estos últimos incluyen proyectos relacionados con actividades de forestación y reforestación de bosques. (Neeff y Henders, 2007)

De esta forma, cada mecanismo genera diferentes tipos de “monedas”, créditos o derechos de carbono para contabilizar las emisiones (AAU, RMU, ERU, CER, entre otros), todas equivalentes a la misma unidad física “la tonelada de CO₂ equivalente” (t CO₂e). Las cuales se pueden comercializar directamente o través de mercados secundarios o bolsas de carbono como la *European Climate Exchange (ECX)*, *Chicago Climate Exchange (CCX)*, entre otras. En estos últimos se establecen precios de mercado para la tonelada de CO₂e reducida o secuestrada para diferentes modalidades de tecnología. Cabe aclarar que mercados como el *Chicago Climate Exchange (CCX)* son considerados alternativos a los de Kioto, dado que se encuentran conformados por empresas, organizaciones y participantes individuales provenientes de países que no ratificaron la primera fase del Protocolo. Estos sistemas imponen diferentes metas de emisiones GEI y créditos de carbono, y han sido caracterizados por ser menos exigentes que los esquemas basados en el PK. (Lecocq y Capoor, 2005).

Por otra parte, los mercados para los créditos forestales MDL están todavía en una etapa exploratoria, dado que la demanda está comandada por los fondos del Banco Mundial. A pesar de que existe un interés inicial de los gobiernos de Europa, aún no se han comprometido directamente con las transacciones de créditos de carbono, proveniente de los proyectos forestales realizados en los países en vías de desarrollo. (Neeff y Henders, 2007).

En virtud de esto, la presente investigación se aproxima a valorar económicamente el servicio de almacenamiento de carbono del manglar de la CGSM, con el objeto de que los tomadores de decisiones implementen acciones de manejo incorporando estos valores en las cuentas ambientales del área. Asimismo, avanzar en la consolidación de alternativas de uso y conservación de estos ecosistemas, donde las actividades de forestación y reforestación como MDL, permitan mitigar las consecuencias del cambio climático, ofreciendo a su vez justificaciones contundentes para reforzar las acciones de manejo y control de los ecosistemas de manglar.

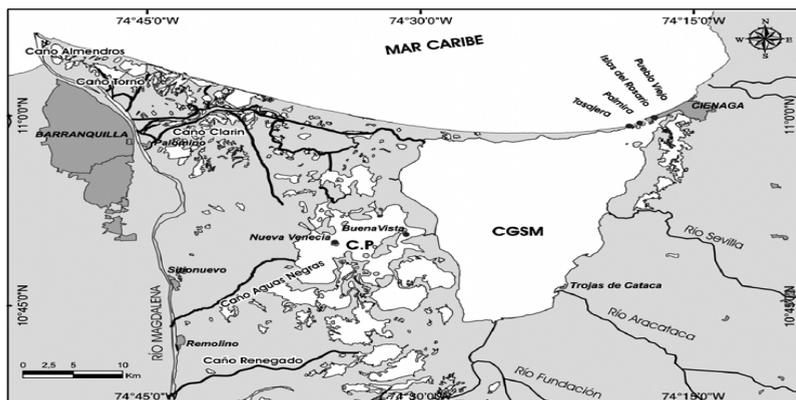
Metodología

Área de estudio

La CGSM se localiza en la Costa Norte del Caribe Colombiano en el Departamento del Magdalena, entre las coordenadas $10^{\circ} 20'$ y $11^{\circ} 05'$ de latitud Norte y $74^{\circ} 06'$ y $74^{\circ} 52'$ de longitud al Oeste de Greenwich (Botero y Salzwedel, 1999). La CGSM es un sistema lagunar estuarino con un área aproximada de 3.487 km², cubierta aproximadamente con 1.280 km² por lagunas costeras, arroyos y manglares. Tiene dos componentes de agua principales, al oriente, la Ciénaga Grande con una extensión de 450 km² y al occidente el Complejo Pajarales, conformado por la Ciénaga Pajarales de 120 km² de extensión y un conjunto de pequeñas lagunas y canales conectados entre sí (Botero y Salzwedel, 1999). Es considerado también el Sistema lagunar costero más grande e importante de Colombia, y el más extenso del Caribe. Sus características ecológicas, hidrológicas y geomorfológicas lo convierten en uno de los sistemas costeros más productivos del trópico. La población que se ubica en los alrededores de la CGSM se distribuye en el norte en cuatro pueblos de carretera (Pueblo Viejo, Islas del Rosario, Palmira y Tasajera) y en tres poblaciones palafitas (Bocas de Aracataca, Buena Vista y Nueva Venecia) tal como se observa en la Figura I. Estas poblaciones están conformadas aproximadamente por 30.000 habitantes, de los cuales 3.215 son pescadores, quienes destinan el 35% de la pesca realizada para el autoconsumo y el restante para el comercio (Zamora *et al.*, 2007).

—|Figura 1.

Localización CGSM y Complejo de Pajarales (CP) se señala los centros poblados Pueblo Viejo, Islas del Rosario, Palmira, Tasajera, Bocas de Aracataca, Buena Vista y Nueva Venecia



No obstante, los manglares en la Ciénaga se encuentran con un alto nivel de estrés por los cambios hidrológicos y el desequilibrio ecológico de la región. Amenazados por la obstrucción de agua dulce, el intercambio de agua que ocurre entre el mar, las ciénagas y la deforestación (UAESPNN, 2004). Estos niveles de estrés se ven reflejados en el incremento de las tasas de pérdida de manglares, donde se registraba una disminución de 1,75 km²/año de 1956 a 1968, 9,8 km²/año de 1968 a 1987, 13,32 km²/año de 1987 a 1993 y 18,43 km²/año de 1993 a 1995 (Mancera, 2003). Sin embargo, los bosques de manglar de la eco-región CGSM han mostrado aumentos y disminuciones de cobertura durante el período 1995-2008. Esto relacionado principalmente con el cambio en las condiciones ambientales, a causa de la apertura de los caños y canales y de las precipitaciones durante los eventos la Niña en los años 1996, 1999-2000 y 2007 – 2008, en los cuales se registran aumentos en la cobertura de los bosques de manglar de 11,9; 43,7; y 21,3 Km², respectivamente. No obstante, esta tendencia de recuperación se ha visto frenada durante eventos climáticos con bajas precipitaciones (años El Niño y neutros). (INVEMAR, 2008; Blanco *et al.*, 2006)

Aproximación cuantitativa

En la primera fase se realizaron los trabajos de campo (cubicación de los árboles, estimación peso del follaje total del árbol y la toma de muestras de tronco (fuste más tocón), Ramas, y Follaje). Los trabajos de laboratorios; la determinación del volumen de las muestras de tronco y rama y la relación peso seco/peso verde de las muestras de tronco, rama y follaje. Finalmente, la cuantificación del carbono en el bosque de manglar siguiendo las sugerencias de Salazar (1989), Soares (1997), Solíz (1998), Infiesta y Tola (2003) y Soares y Schaeffer-Novelli (2005). Las anteriores adaptadas y modificadas en cierta medida para los objetivos específicos y peculiaridades del área de estudio. La segunda fase consistió en la valoración económica utilizando como metodología la valoración directa a través de precios de mercado por el servicio de secuestro de carbono.

Estimación de biomasa

Se evaluaron 3 especies con DAP \geq 2.5 cm, identificadas y reportadas por el monitoreo de las condiciones ambientales en la CGSM. El cual comprende una superficie de 29.800 ha (año 2008) donde la especie *A. germinans* fue la más representativa del área con un 42,67%, seguida de *R. mangle* y *L. racemosa* con 33,44% y 23,89% respectivamente, de acuerdo con las mediciones realizadas en cuatro estaciones de monitoreo (Caño Grande, Rinconada, Aguas Negras y Luna). (INVEMAR, 2008)

Para este estudio se evaluaron 5 plantas por especie con DAP > 2.5 cm en el sector de Rinconada. La determinación de la biomasa aérea, se basó en la cubicación del fuste, del tocón, estimación del volumen de ramas primarias y secundarias, estimación del peso del follaje total del árbol y la toma de muestras de cada una de las secciones anteriores para posteriormente calcular la densidad de madera y la relación peso seco/ peso verde en laboratorio. La evaluación del contenido de

carbono, generó ecuaciones alométricas a partir del diámetro (DAP) y la altura total. A continuación se especifican estas mediciones.

La cubicación del fuste consistió en la determinación del volumen del tronco del árbol a partir de secciones de 2 m, hasta la inserción con la primera rama para el caso de árboles caídos. También, se midió el diámetro al principio y al final de cada sección hasta la última sección. El volumen se obtuvo sumando los volúmenes de cada sección, a partir de la fórmula de Smalian:

$$V(m^3) = \frac{\pi}{4} \times \left[\frac{d_1 + d_2}{2} \right] \times L$$

Donde, V= volumen de la sección en m³, d₁= diámetro inferior en m, d₂= diámetro superior en m, y L= longitud de la sección en m.

El volumen del tocón se obtuvo de la medida de la parte del tronco unida a la raíz, se midió longitud y diámetro (en el extremo superior) y se utilizó la fórmula del cilindro:

$$V(m^3) = \frac{\pi}{4} \times d^2 \times L$$

Donde, V= volumen en m³, d= diámetro en m, y L=longitud en m

El volumen de ramas primarias y secundarias, las de forma gruesa y recta se cubicaron a 2 m, el volumen se obtuvo a partir de la fórmula de Smalian. Las ramas con forma menos recta, fueron cortadas a 1 m de longitud, se midió el diámetro de la parte central y se empleó la fórmula del cilindro. Las ramas menores a 1 m de largo y a 3 cm de diámetro fueron pesadas en una balanza. La estimación del peso verde del follaje, consistió en el producto de su peso en ramas de diferentes tamaños por el número de ramas similares en el árbol.

Se llevaron a laboratorio muestras correspondientes: a) discos en el tocón, y en fuste. b) secciones de diferentes ramas y c) el follaje. Para a) y b) se les determinó el volumen, luego a), b) y c) fueron pesadas para hallar su peso verde y se colocaron en un horno a 80° C hasta obtener un peso constante con el fin de encontrar su peso seco. De este modo, para los componentes de tocón, fuste y ramas gruesas la biomasa se calculó del producto de la densidad media de madera ponderada (kg de biomasa secada al horno por volumen de existencia verde m⁻³) por la cubicación con corteza (o existencia) estimado en campo. Para el follaje y ramas menores a 1 metro de largo y 3 cm de diámetro la biomasa se calculó a partir del producto del peso obtenido en campo por la relación peso seco/peso verde. La biomasa total de cada individuo se obtiene mediante la suma total de la biomasa de los distintos componentes del árbol.

Para la estimación de la biomasa aérea (tronco, ramas y hojas) de un rodal forestal, el procedimiento más común es el método de estimación por regresión.

Este consiste en el muestreo destructivo de unos cuantos árboles para relacionar alguna de sus variables fáciles de medir (altura, diámetro altura de pecho) con el contenido de biomasa, utilizando para ello métodos de regresión; con el objeto de estimar las primeras variables en función de las segundas (Garzuglia y Saket, 2003). Para este estudio, la estimación de biomasa aérea generó ecuaciones de biomasa total y por compartimentos a partir de los datos de 5 ejemplares de Ag, 5 de Lr y 5 de Rm para diferentes tipos de $DAP \geq 2.5$ cm, sin embargo se han encontrado errores aceptables en la estimación de biomasa con tamaños de muestras mayores a 20 individuos (Salinas y Hernandez, 2008). No obstante, en los estudios sobre evaluación de biomasa, se ha trabajado con muestras muy pequeñas (iguales o inferiores a 10 arboles) hasta otras que alcanzan centenares véase por ejemplo a Fromard *et al.* (1998) y Soares y Schaeffer-Novelli (2005). En este ejercicio de valoración económica se utilizó una muestra 5 individuos por especie, debido a que es un muestreo destructivo de arboles y dado que área de estudio se encuentra aún en proceso de recuperación de las condiciones ambientales y vegetales del bosque de manglar.

De esta forma, el modelo de regresión que se utilizó para predecir la biomasa de los componentes tronco, ramas y biomasa aérea total, fue el siguiente:

$$h(B) = \beta + \alpha * h(DAP)$$

Este modelo se ha empleado en números estudios para determinar la biomasa aérea de los arboles (Fromard *et al.* 1998; Soares y Schaeffer-Novelli 2005, entre otros). Mientras que para las predicciones de biomasa en las hojas, se consideraron al mismo tiempo las variables de diámetro a altura de pecho y la altura del árbol, representada por el siguiente modelo:

$$h(B) = \beta - \mu(DAP^2 * Alt) + \alpha h(DAP^2 * Alt)$$

Donde, B= biomasa en Kg, DAP= diámetro a altura de pecho en metros, Alt= altura total en m, α , β , μ = Coeficientes de regresión

Para la cuantificación del carbono se utilizaron las densidades por hectárea de cada especie de manglar en cada sitio (Rinconada, Caño Grande, Aguas Negras y Luna), según la información reportada en el monitoreo de vegetación (INVEMAR, 2008), a partir de la siguiente relación:

$$CC = (\%C) \times Di \times Bi$$

Donde, CC= Contenido de carbono de la especie "i" en $t C \cdot ha^{-1}$, %C= 50% según IPCC (1996), Di= Densidad de la especie "i" ($ind. ha^{-1}$), Bi= Biomasa de la especie "i" ($t ha^{-1}$).

Valoración económica

Una vez obtenido las existencias de carbono por hectárea, especie y total, presentes en el área de estudio, el siguiente paso fue valorar monetariamente estas existencias, que es la parte central del objetivo de este trabajo. Para valorar el almacenamiento de carbono realizado por el bosque de manglar, se realizó un análisis en diferentes opciones de precios, el cual fue establecido teniendo en cuenta la venta de este servicio ambiental a nivel internacional en las bolsas de carbono o como parte de acuerdos bilaterales entre países desarrollados y subdesarrollados, con el fin de disminuir las emisiones de CO₂ en la atmósfera. En este caso se tuvo en cuenta los precios pagados por el Banco Mundial frente a otros precios de referencia proveniente de los mercados de carbono de la Unión Europea y Chicago, para tipos de moneda CERs (Certificados de Emisiones Reducidas) y VERs (Reducciones de Emisiones Verificadas), respectivamente. Estos precios de mercado equivalen a una tonelada de CO₂e (dióxido de carbono equivalente), es decir; 3,6666 toneladas de carbono; de acuerdo con Pedroni (2004). Finalmente, la valoración del servicio del bosque como sumidero de carbono, se realizó con precios promedio de mercado de US\$ 3,5 dólares para los certificados forestales pagados por el Banco Mundial a través de su fondo *Community Development Carbon Fund* (CDCF). En contraste con los precios de € 14,5 y 17,5 euros que alcanza la tonelada de CO₂e reducida o secuestrada para diferentes modalidades de tecnología en los mercados de Chicago y la Unión Europea.

Resultados

Medición de la biomasa

Una vez colectadas las muestras en campo, se obtuvieron los pesos verdes y secos para el tronco, ramas y hojas. De este modo, se determinó la gravedad específica (relación peso seco/peso verde) para cada componente del árbol, el valor más alto de gravedad se encontró en el tronco, siendo mayor en *Ag*, seguido del *Rm* y *Lr*. Mientras que para el caso de las ramas los mayores valores se presentaron en la *Lr* y *Rm*. Concretamente, los promedios de gravedad específica señalan la superioridad del tronco en este índice con 61,7%, seguido de las ramas con 44,7% y por último las hojas con 36,7% observar Tabla I.

Tabla 1.

Gravedad específica promedió para *L racemosa*, *A germinans*, *R m*

Especie	Compartimentos	Relación
<i>Laguncularia racemosa</i>	Tronco	0,59
	Ramas	0,47
	Hojas	0,37
<i>Avicennia germinans</i>	Tronco	0,65
	Ramas	0,41
	Hojas	0,37
<i>Rhizophora mangle</i>	Tronco	0,61
	Ramas	0,46
	Hojas	0,35

En la estimación de la biomasa total y los componentes (tronco, ramas y hojas) de las especies de mangle, la transformación logarítmica presentó el mejor ajuste a los datos. Los cuales arrojaron R^2 ajustados entre 0,70 y 0,99 y pruebas F-Fisher y t-student con $P < 0,05$, tal como se detalla en la Tabla II. También se observa que en las ecuaciones de biomasa total, se presentaron los mayores ajustes y significancias de las variables, a diferencia con las presentadas en las ecuaciones de biomasa de tronco y rama, lo cual indica un mayor grado de correlación entre la biomasa y el DAP cuando se unifican los componentes de biomasa de los árboles.

De igual forma, se observa en la Tabla II, mayor significancia estadística para los componentes más leñosos de los árboles (tronco y rama), en los modelos en los que solo se incluyó el DAP como variable explicativa. Mientras que para la estimación de la biomasa en hojas, se requirió la inclusión de la variable altura en las ecuaciones, para que los estimadores presentaran significancia y mayor nivel explicativo, con excepción en la biomasa de hojas para la especie *Rhizophora mangle*.

Tabla 2.

Modelos de regresión estimados para la biomasa aérea total y por compartimentos de las especies *L. racemosa* (*Lr*), *A. germinans* (*Ag*), *R. mangle* (*Rm*), BT. (Biomasa de Tronco), BR. (Biomasa de Ramas), BH. (Biomasa de Hojas), BA. (Biomasa Aérea Total), DAP (Diámetro Altura de Pecho), Alt. (Altura total del árbol)

Especie		Ecuación	R ² adj	Valor p
<i>Lr</i>	Tronco	$\text{Ln}(\text{BT}) = 4,337 + 2,523 \text{ Ln}(\text{DAP})$	0,958	0,002
	Ramas	$\text{Ln}(\text{BR}) = 1,687 + 3,372 \text{ Ln}(\text{DAP})$	0,816	0,023
	Hojas	$\text{Ln}(\text{BH}) = 0,051 - 0,003 (\text{DAP}^2 * \text{Alt.}) + 1,457 \text{ Ln}(\text{DAP}^2 * \text{ALT})$	0,884	0,058
	Aérea	$\text{Ln}(\text{BA}) = 4,40946 + 2,73218 \text{ Ln}(\text{DAP})$	0,979	0,000
<i>Ag</i>	Tronco	$\text{Ln}(\text{BT}) = 3,94642 + 2,77005 \text{ Ln}(\text{DAP})$	0,975	0,001
	Ramas	$\text{Ln}(\text{BR}) = 5,42098 + 0,77811 \text{ Ln}(\text{DAP})$	0,753	0,036
	Hojas	$\text{Ln}(\text{BH}) = 2,54241 + 0,00003 (\text{DAP}^2 * \text{Alt.}) + 0,61163 \text{ Ln}(\text{DAP}^2 * \text{Alt.})$	0,928	0,036
	Aérea	$\text{Ln}(\text{BA}) = 4,69547 + 2,48879 \text{ Ln}(\text{DAP})$	0,991	0,000
<i>Rm</i>	Tronco	$\text{Ln}(\text{BT}) = 6,73694 + 1,62817 \text{ Ln}(\text{DAP})$	0,930	0,005
	Ramas	$\text{Ln}(\text{BR}) = 0,05620 + 4,38617 \text{ Ln}(\text{DAP})$	0,702	0,048
	Hojas	-----	---	---
	Aérea	$\text{Ln}(\text{BA}) = 6,15105 + 2,11882 \text{ Ln}(\text{DAP})$	0,949	0,003

Cuantificación del carbono

En la Tabla III, se muestra la biomasa de cada especie a partir de la densidad (Ind /ha) y al DAP (medio) en cada zona del bosque de manglar. Así, partiendo del análisis por especie, se observa que para un DAP medio de $12,1 \pm 4,5$ la especie *Lr* presentó en término medio la mayor biomasa ($16,2 \text{ t ha}^{-1}$) y carbono ($8,1 \text{ t ha}^{-1}$) en la zona de Aguas negras. Similarmente, para *Ag* se estimó entre $68,6$ (biomasa aérea) y $34,3$ (existencia de carbono) t ha^{-1} para Rinconada a partir de un DAP medio de $14,8 \pm 9,6$. Finalmente, el almacenamiento de carbono en *Rm* fue superior en Caño grande con $22,8 \text{ t ha}^{-1}$ para un DAP medio de $8,0 \pm 3,7$. En contraste con Luna, se obtuvieron las menores existencias de carbono y biomasa.

Tabla 3.

**Biomasa total y carbono almacenado por especie de manglar en la CGSM. *L. racemosa* (Lr), *A. germinans* (Ag), *R. mangle* (Rm).
Diámetro a la Altura del Pecho (D)**

Especie	Zona	Densidad (Ind ha ⁻¹)	DAP medio	Biomasa total (t ha ⁻¹)	Carbono almacenado (t ha ⁻¹)
Lr	Aguas negras	333	12,1± 4,5	16,2	8,1
	Caño grande	100	9,3±5,6	2,7	1,4
	Luna	113	6,7±1,5	1,5	0,8
	Rinconada	420	8,2±3,6	8,7	4,4
Ag	Aguas negras	300	12,0±6,0	15,9	8,0
	Caño grande	507	12,1±6,2	27,5	13,7
	Luna	153	11,5±4,9	7,3	3,7
	Rinconada	767	14,8±9,6	68,6	34,3
Rm	Aguas negras				
	Caño grande	1187	8,0±3,7	45,6	22,8
	Luna	113	8,3±3,9	4,7	2,4
	Rinconada	53	19,8±11,7	14,0	7,0

Valoración económica del carbono almacenado

Al asignar un valor de cambio o precio de mercado al almacenamiento de carbono del bosque de manglar convirtiendo las toneladas de carbono en toneladas de CO₂e. El análisis por zonas, mostró que la especie *Lr*, obtuvo la mayor existencia de CO₂e (29,9 t ha⁻¹) en el sector de Aguas negras, entre US\$ 104,5 y 3.034 ha⁻¹. Este primer valor corresponde a los precios pagados por los fondos del Banco Mundial, mientras que el segundo proviene de los precios que han alcanzado la tonelada de CO₂e en el mercado de la Unión Europea. No obstante, hay un valor intermedio (Tabla IV), el cual corresponde al promedio de los últimos

valores transados en el Mercado de Chicago (mercado voluntario por fuera de los esquemas de Kioto).

Del mismo modo, en el sector de Rinconada la especie *Ag* almacenó en promedio la mayor cantidad de CO₂e con 126,9 t ha⁻¹, que en términos monetarios equivalen a US\$ 444,24 y 12,888 ha⁻¹ para los fondos del Banco Mundial y el mercado de la Unión Europea, respectivamente. La especie *Rm*, acumuló en promedio la mayor cantidad de CO₂e en Caño grande con 84,4 t ha⁻¹, valorados entre US\$ 177,84 y \$ 5159,5 ha⁻¹. Encontraste con Luna, la cual fue la zona con menores existencias de CO₂e con 2,8, 13,5, y 8,7 t ha⁻¹ para las tres especies de mangle. De este modo, tomando como referencia el promedio aritmético entre las distintas zonas, se observa a la especie *Ag* con la mayor existencia de CO₂e, y por ende el valor económico más alto en el bosque de manglar con 55,2 t CO₂e ha⁻¹, seguida de la *Rm* (39,7 t ha⁻¹) y *Lr* (13,5 t ha⁻¹) observar Tabla IV.

Tabla 4.

Valoración económica de CO₂e discriminados por especie y zona en el bosque de manglar de la CGSM. MC: Mercado de Chicago. FBM: Fondos del Banco Mundial. MUEA: Mercado de la Unión Europea. L. racemosa (*Lr*), A. germinans (*Ag*), R. mangle (*Rm*)

Especie	Zona	T CO ₂ e ha ⁻¹	Valor US\$ ha ⁻¹		
			FBM	MC	MUEA
<i>Lr</i>	Aguas negras	29,9	104,59	523,14	3034,2
	Caño grande	5,1	17,72	88,65	514,19
	Luna	2,8	9,86	49,3	285,93
	Rinconada	16,2	56,64	283,32	1643,28
<i>Ag</i>	Aguas negras	29,5	103,14	515,92	2992,32
	Caño grande	50,8	177,84	889,57	5159,5
	Luna	13,5	47,41	237,14	1375,4
	Rinconada	126,9	444,24	2222,11	12888,22
<i>Rm</i>	Aguas negras		0	0	0
	Caño grande	84,4	295,42	1477,7	8570,67
	Luna	8,7	30,49	152,53	884,67
	Rinconada	25,9	90,52	452,78	2626,14

Discusión

En la CGSM, la intervención a partir de diferentes actividades antrópicas ha influido en las condiciones naturales del ecosistema de manglar, representada principalmente por la interrupción del intercambio hídrico entre el complejo lagunar y el mar, la disminución de entrada de agua dulce proveniente del río Magdalena. Lo anterior, a causa de construcciones de vías de comunicación, entre otros eventos, los cuales representaron incrementos en la salinidad de los suelos de manglar. Por tanto, han simbolizado consecuencias, como la muerte de 41% de bosque de manglar para el periodo 1956 – 2008 (INVEMAR, 2003; 2008). En este contexto, la mayor biomasa aérea se localizó en Rinconada con $68,6 \text{ t ha}^{-1}$ de *Ag* superando en un 97% al registrado en Luna ($1,5 \text{ t ha}^{-1}$) para *Lr*, la cual reporto la menor biomasa. Por consiguiente, las existencias de carbono son muy variables entre los distintos sitios de la CGSM con un máximo de $45,7 \text{ t C ha}^{-1}$ (Rinconada) a $6,9 \text{ t C ha}^{-1}$ (en Luna). Esto puede atribuirse a la ubicación de los sitios (Rinconada, Caño Grande, Aguas Negras y Luna), debido a que Rinconada posee el mayor desarrollo estructural del bosque, con rangos óptimos de salinidad para el desarrollo de los manglares (< 50) y menor grado de perturbación, mientras que Luna es el área más afectada, con menor cobertura vegetal y altos valores de salinidad. (INVEMAR, 2008)

Los montos máximos valorados por el servicio de almacenamiento de carbono fueron de US\$ 591,41 a $17.157,64 \text{ ha}^{-1}$ en Rinconada y el mínimo de US\$ 87,76 a $2545,99 \text{ ha}^{-1}$ para Luna. De acuerdo con Sanjurjo y Welsh (2005), un estimativo muy conservador de captura de carbono en bosques de manglar podría traducirse en US\$ 1.000 ha^{-1} ; aunque actualmente, el Banco Mundial es el comprador más grande de créditos del MDL forestal gracias al fondo Biocarbon (BioCarbon Fund). De esta forma, los precios pagados por el Banco Mundial proporcionan un indicador más factible de los precios de venta que podrían alcanzar los CERs forestales, en comparación con los precios pagados en otros sectores de tecnología (Neeff y Henders, 2007). Esto puede atribuirse a los argumentos que se oponen a la utilización de las remociones de carbono basadas en actividades forestales tales como la conservación de bosques primarios y la prevención de la deforestación.

El protocolo de Kioto en el artículo 3.3 estableció que sólo aquellos sumideros relacionados con actividades de forestación y reforestación inducidas directamente por actividades humanas posteriores a 1990 en terrenos no cubiertos por vegetación natural, son las únicas elegibles a proyectos MDL. Por tanto, los servicios de almacenamiento de los bosques primarios y demás ecosistemas forestales están excluidos del mercado carbono. Por otro lado, los proyectos de forestación y reforestación bajo el MDL, son las únicas que generan créditos tCERs (Reducciones Certificadas de Emisiones temporales), ICER (Reducciones Certificadas de Emisiones de largo plazo), los cuales pierden su valor después de un periodo de vencimiento predefinido. Lo anterior mencionado, se debe básicamente a la naturaleza no permanente de la vegetación como sumidero. Puesto que estos son potencialmente reversibles cuando se presentan disturbios

tales como incendios o cuando se regresan los suelos forestales nuevamente a suelos de pastoreo como ejemplo, liberando de nuevo el carbono a la atmósfera y revirtiendo el beneficio climático inicialmente obtenido (Schlamadinger *et al.*, 2005; Locatelli y Pedroni, 2004).

Pese a lo anterior, las actividades forestación y reforestación bajo el MDL tienen el potencial de mejorar los medios de vida de los habitantes de zonas rurales empobrecidas en los países en vías de desarrollo, al apalancar inversiones en el sector forestal que de otra manera no hubieran ocurrido en la ausencia de la posibilidad de vender CERs. Por ahora, no hay certeza sobre la existencia de mercados de carbono después del 2012, cuando termine el primer período de cumplimiento del Protocolo de Kioto. Debido a que prácticamente ningún comprador está comprometiéndose en transacciones de créditos de carbono en un marco de tiempo más allá del 2012, salvo el Banco Mundial (Neeff y Henders, 2007). En este sentido, la valoración económica del servicio de almacenamiento de carbono del manglar de la CGSM, implica avanzar en análisis que involucre reconocer las funciones del sistema natural, los valores locales de uso tradicional a fin de generar criterios de decisión para la asignación de formas de uso y conservación de este ecosistema.

Si bien el potencial forestal de los bosques de manglar como sumideros de carbono existe, se encontró que en términos relativos los bosques de manglar de la CGSM almacenan entre 6,9 (Luna) y 45,7 (Rinconada) t C ha⁻¹, mientras que en otras regiones como Florida los valores son 3,9 t C ha⁻¹ (Lugo y Snedaker, 1974) y 230 t C ha⁻¹ (Putz y Chan, 1986) en Malasia, aproximadamente. El almacenamiento por ha en el bosque es una muestra clara de que existe una potencialidad en estos bosques que debería ser incorporada a la toma de decisiones de uso de este ecosistema.

Recomendaciones

La valoración de bienes y servicios ecosistémicos del manglar, con miras de generar información de base para implementar pago por servicios ambientales, es una alternativa de desarrollo de estos mercados en pro de su conservación. Las estimaciones de la biomasa aérea de *Ag*, *Rm*, *Lr*, en la CGSM, permiten recomendar el uso de los modelos alométricos que generen regresiones con un mayor número de datos y variables independientes, para minimizar así el error de estimación. Para tal fin, se recomienda dar igual importancia a las mediciones de biomasa en campo, dado que la determinación precisa de esta, asegura una estimación real de la cantidad de carbono acumulado en el bosque de manglar. Para posteriores cuantificaciones de carbono, se recomienda determinar la fracción o porcentaje de carbono presente en la biomasa de cada especie de manglar, la cual permitirá conocer de manera precisa la cantidad de carbono almacenado. En este sentido, se debe ir avanzando en los estudios de captura de carbono en la biomasa de las plantas a través de su fenología y sedimentos del suelo.

En la valoración del uso del ecosistema manglar, se sugiere abordar metodologías que involucren diferentes relaciones entre las variables que definen el actual patrón de uso de los recursos del área y se adapten a propuestas de manejo concertadas con los usuarios de este sistema. Se recomienda ampliar el análisis a los diferentes actores involucrados en el uso del área que ejercen presión en la ecorregión de la CGSM, por ejemplo, autoridad ambiental, usuarios directos e indirectos, organismos de control, entre otros, con el fin de potenciar sinergias en los ejercicios de valoración.

Agradecimientos

Esta investigación se enmarcó dentro del proyecto para la asistencia técnica y valoración Ecosistémica de los Recursos Marinos Vivos de Colombia y la formulación de criterios científicos para su aprovechamiento sostenible. Este trabajo fue posible gracias al apoyo financiero y logístico del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras y el Ministerio de Vivienda y Desarrollo Territorial. Agradecemos al programa de Valoración y Aprovechamiento de Recursos Marinos y Costeros, así como al señor Carlos Carbonó por el trabajo de campo. A Laura Perdomo, Carlos Villamil y Alianis Orjuela por los pertinentes comentarios y apoyo logístico durante la investigación.

Bibliografía

- Botero, L. y Salzwedel H., (1999). Rehabilitation of the Ciénaga Grande de Santa Marta, a mangrove-estuarine system in the Caribbean coast of Colombia. *Ocean Coast Manage.* Vol. 42. Pp. 243-256
- Blanco, J.A., Vitoria E.A. y Narváez J.C. (2006). ENSO and salinity changes in the Ciénaga Grande de Santa Marta coastal lagoon system, Colombian Caribbean. *Estuarine, Coastal and Shelf Science.* Vol. 66. Pp. 157- 167
- Fromard, F., Puig H., Mougín E., Marty G., Betoulle J.L., Cadamuro L. (1998). Structure, above-ground biomass and dynamics of mangrove ecosystems: new data from French Guiana. *Oecologia.* Vol. 115. Pp. 39-53
- Garzuglia, M. y Saket M. (2003). Wood volume and woody biomass. Food and Agricultural Organization of the United Nations. Roma. Pp. 30
- Infiesta, E. y Tola, J. (2003). Atlas Básico de Ecología. Parramón. Pp.96
- INVEMAR. (2003). Monitoreo de las condiciones ambientales y los cambios estructurales y funcionales de las comunidades vegetales y de los recursos pesqueros durante la rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta: un enfoque adaptativo. Informe ejecutivo. 1999-2002. Pp. 68 +Anexos.
- INVEMAR. (2008). Monitoreo de las condiciones ambientales y los cambios estructurales y funcionales de las comunidades vegetales y de los recursos pesqueros durante la rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Informe técnico final. INVEMAR. Pp. 102 +Anexos.

- IPCC (1996). Intergovernmental Panel on Climate Change. Report of the twelfth session of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Reference manual and workbook of the IPCC 1996 revised guidelines for national greenhouse gas inventories. Mexico city, 11-13 september 1996.
- Keeling, R.F., Piper S.C., Bollenbacher A.F. y Walker J.S. (2009). Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A. doi: 10.3334/CDIAC/atg.035
- Lecocq, F. y Capoor K. (2005). State and trends of the carbon market 2005. Washintong, D.C.: The world Bank. Pp. 44
- Locatelli, B y Pedroni L. (2004). Accounting methods for carbon credits: impacts on the minimum area of forestry projects under the Clean Development Mechanism, *Climate Policy*. Vol. 4. Pp. 193-204
- Lugo, A.E., Snedaker S.C. (1974). The ecology of mangroves. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* Vol. 5. Pp. 39-64
- Mancera, J. E. (2003). The contribution of mangrove outwelling to coastal food webs as a function of environmental settings. Tesis de doctorado no publicada. University of Louisiana. Pp. 135
- Neeff, T. y Henders S. (2007). Guía sobre los Mercados y la Comercialización de Proyectos MDL Forestales. Serie técnica, Manual técnico 65, CATIE. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE, L. Morera(ed), Turrialba, C.R. Pp. 44
- Parques Nacionales Naturales de Colombia (UAESPNN). (2004). Plan de manejo básico del Santuario de Fauna y Flora Ciénaga Grande de Santa Marta, 2005-2009. Pp. 356
- Pedroni, L. (2004). No permanencia y cálculo de créditos: Desarrollo de Proyectos de Reforestación y de Bioenergía bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio. www.cd4cdm.org/.../Ecuador/.../ju_4_nopermanencia_power.pdf.5/09/2009.
- Putz, F., Chan H.T. (1986). Tree growth, dynamics, and productivity in a mature mangrove forest in Malaysia. *Forest Ecol. Manage.* Vol. 17. Pp. 211-230.
- Sachs, J. (2008). Economía para un planeta abarrotado. *Debate*, Barcelona. Pp. 526.
- Salazar, R. (1989). Guía para la investigación silvicultural de especies de uso múltiple. Serie Técnica. *Boletín técnico* Vol. 20. Pp. 193
- Salinas, Z., Hernandez P., eds. (2008). Guía para el diseño de proyectos MDL forestales y de bioenergía. CATIE, Turrialba, Costa Rica. Pp. 48
- Sanjurjo, E.R. y Welsh S.C. (2005). Una descripción del valor de los bienes y servicios ambientales prestados por los manglares. *Gaceta Ecológica* Vol. 74. Pp. 55-68
- Schlamadinger, B., Bosquet B., Streck C., Noble I., Dutschke M. y Neil, B. (2005). Can the EU emission trading scheme support CDM forestry? *Climate Policy* Vol. 5. Pp. 199-208
- Soares, M.L.G., (1997). Estudo da biomassa aérea de manguezais do sudeste do Brasil e análise de modelos, vol. 2. PhD thesis, Instituto Oceanográfico, Universidade de Sao Paulo, Brazil. Pp. 560
- Soares, M.L.G. y Schaeffer-Novelli (2005). Above-ground biomass of mangrove species. I. Analysis of models *Estuarine, Coastal and Shelf Science* Vol. 65. Pp. 1-18
- Solíz, S.B.G. (1998). Valoración económica del almacenamiento y fijación de carbono en un bosque sub-húmedo estacional de Santa Cruz, Bolivia. Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza. Tesis de Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica. Pp. 113 + Anexos.

- Valiela, I., Bowen J., y York J.K., (2001). Mangrove forests: one of the world's threatened major environments. *Bioscience* Vol. 51. Pp. 807-815
- Zamora, A.P., Narváez J.C., y Londoño L.M. (2007). Evaluación económica de la pesquería artesanal de la Ciénaga Grande de Santa Marta y Complejo de Pajarales, Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras de INVEMAR* Vol. 36. Pp. 33-48