

Valoración económica del secuestro de carbono
en un sector del Parque Nacional Waraira
Repano (Caracas, Venezuela)
*Economic evaluation of carbon sequestration in
an area located at national park Waraira repano
(Caracas, Venezuela)*

VLADIMIR VALERA¹
vvaleram@gmail.com
Universidad Metropolitana
Universidad Simón Bolívar

NELSON CARVAJAL²
nelson_jcr01@hotmail.com
Universidad Metropolitana
Universidad Simón Bolívar

Recibido: 07/03/2014
Aceptado: 16/05/2014

Resumen

El objetivo de la investigación fue estimar el potencial de captación de carbono y su valor económico en un área de 10,6 hectáreas del Parque Nacional Waraira Repano (el Ávila). Para ello fue necesario realizar un inventario forestal y calcular algunas variables de interés, como biomasa e índice de carbono de las especies dominantes. La biomasa de las especies forestales presentes en el sector se estimó mediante ecuaciones alométricas publicadas

¹ Estudiante del Doctorado en Desarrollo Sostenible de la Universidad Simón Bolívar, Magister Scientae en Economía y Sociología Ambiental del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) Costa Rica, Ingeniero agrónomo de la Universidad Central de Venezuela. Profesor de la Universidad Metropolitana y de la Universidad Simón Bolívar (Venezuela).

² Ingeniero Químico egresado de la Universidad Metropolitana.

en la literatura, y para las especies arbustivas y herbáceas se determinó mediante el corte a ras del suelo y peso de las mismas antes y después de secarlas. El índice de carbono para todas las especies se determinó en el laboratorio mediante el método calorimétrico. Finalmente, para la valoración económica del servicio ambiental se utilizó el precio promedio de la tonelada de CO₂ equivalente establecido en la bolsa europea de carbono. Se encontró que el área de estudio contiene al menos 4.503,45 toneladas métricas de CO₂ equivalente (868,9 t CO₂/ha), valoradas en US\$. 59.856,15.

Palabras clave: secuestro de carbono, biomasa, valoración ambiental, Waraira Repano.

Abstract

The objective of the research was to estimate the potential carbon uptake sequestration and its economic value in an area of 10.6 ha at Waraira Repano National Park (Avila). It was necessary to conduct a forest inventory and to calculate some variables of interest and rate of carbon biomass of the dominant species. The biomass of forest species in the area was estimated by allometric equations previously found in the review of literature. The shrub and herbaceous species were determined by cutting storey brand of the same before and after drying. The carbon index for all species was determined in the laboratory by the calorimetric method. Finally for the economic evaluation of environmental services, the European average carbon exchange price per ton of CO₂ was used. It was found that the study area contains at least 4503.45 equivalent metric tons of CO₂ (868.9 t CO₂/ha) worth U.S. \$. 59856.15.

Key words: carbon sequestration, biomass, environmental valuation, Waraira Repano.

Introducción

Es evidente el fenómeno del cambio climático que afecta actualmente al planeta, debido al aumento de temperatura en la atmósfera terrestre ocasionado por el incremento de gases de efecto invernadero, tales como el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₃), óxido nitroso (NO₂), entre otros; productos del uso de combustibles fósiles, la quema de biomasa vegetal y la deforestación. Este aumento de la temperatura altera la



distribución de la energía en la atmósfera, afectando así el clima, el ciclo hidrológico y otros fenómenos naturales que tienen a su vez impactos negativos sobre las actividades del hombre y ponen en riesgo la supervivencia de las especies y ecosistemas (WWF Programa Internacional Ártico, 2009).

Sin embargo, los bosques naturales y las plantaciones forestales juegan un rol importante en la regulación climática al ser capaces de fijar CO₂, principal gas de efecto invernadero, mediante la fotosíntesis, regulando el intercambio de carbono entre la atmósfera y la biomasa; lamentablemente, este tipo de servicio ambiental no ha sido suficientemente evaluado tanto en términos de retención de carbono como por su valor económico para la sociedad.

Este es el caso del Parque Nacional Waraira Repano (el Ávila), ubicado en la Cordillera de la Costa en Venezuela, el cual constituye un gran ente de mitigación de carbono para la ciudad de Caracas, dada su extensión y existencia de zonas boscosas, pero cuyo servicio ambiental no ha sido valorado en términos físicos y económicos.

En tal sentido, el objetivo general de la presente investigación fue estimar el potencial de captación de carbono y su valor económico en un área de 10,6 hectáreas del Parque Nacional Waraira Repano (el Ávila), teniendo como objetivos específicos los siguientes: i) estimar la biomasa vegetal de la zona a partir de la composición florística; ii) estimar el índice de carbono de la vegetación con el método calorimétrico; y iii) determinar el valor económico del carbono fijado en la biomasa de la zona, tomando como referencia el precio del carbono establecido en los mercados internacionales.

Cambio climático y función reguladora de los bosques

La presencia de gases atmosféricos como vapor de agua, dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, ozono, entre otros, le dan a la atmósfera la capacidad de retener parte de la energía o radiación infrarroja reflejada por la superficie terrestre, manteniendo una estabilidad de la

temperatura y de las condiciones climáticas necesarias para el desarrollo de vida en la Tierra, lo que se conoce como efecto invernadero (Seoáñez, 2002; IPCC, 2008).

Sin embargo, a lo largo del tiempo, actividades humanas como el consumo de energía (quema de combustible fósil), quema de biomasa, sobreexplotación de recursos naturales, aumento poblacional y deforestación vinculada con la expansión de las ciudades y la ampliación de la frontera agrícola, entre otras, han incrementado la concentración de los gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre, afectando el clima, la temperatura y el ciclo hídrico (Cubero y Rojas, 1999). Esta modificación de los valores medios de las propiedades del clima durante largos períodos de tiempo, atribuida directa o indirectamente a las actividades humanas, es lo que se conoce como cambio climático (IPCC, 2008), y existe preocupación de que las consecuencias resultantes del mismo sean irreversibles para algunos sistemas, con efectos a escala global (WWF Programa Internacional Ártico, 2009).

Existen formas de mitigación de CO₂ naturales en el planeta; éstas se manifiestan mediante la acumulación de carbono por tiempos prolongados en la biomasa vegetal, suelos y océanos. La primera forma se efectúa mediante el proceso de fotosíntesis y la segunda a través de la descomposición y mineralización de la materia orgánica. En este sentido los bosques, sabanas y plantaciones son los grandes reguladores de la concentración de CO₂ en la atmósfera en medios terrestres, y los responsables del mantenimiento del equilibrio climático mundial (Lagos y Vanegas, 2003). En este sentido, Solís (1998) señala que en un futuro los bosques podrían ser de mayor valor económico por sus funciones ecológicas que por la obtención de productos derivados directamente de la explotación de los mismos como la madera, debido a las consecuencias que podrían producirse en el mundo por el cambio climático.

El Protocolo de Kyoto y el mercado de carbono

El Protocolo de Kyoto, de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, fue adoptado en Japón en diciembre



del año 1997. El mismo entró en vigencia el 16 de febrero del 2005. El objetivo que busca dicha convención es la estabilización de las emisiones de gases de efecto invernadero a una escala que prevenga daños al ambiente. En dicho protocolo se establece como objetivo primordial que los países desarrollados (conocidos como “Partes del Anexo I”) limiten las emisiones de los gases en cuestión. Para ello el Protocolo de Kyoto ha estimulado, entre otros mecanismos, la creación de los mercados de carbono para facilitar el cumplimiento de los compromisos de mitigación asumidos por las partes, donde los países del Anexo I pueden obtener certificados de reducción de gases de efecto invernadero sin afectar su nivel de consumo energético, negociando con los países partes no adscritos a dicho Anexo (países en vías de desarrollo), donde se establecen sumideros de carbono, como plantaciones forestales, a cambio de la obtención de recursos financieros o tecnológicos (Lagos y Vanegas 2003; UNFCCC, 2008).

Debido a este mercado muchos países se han esforzado en cuantificar la cantidad de CO₂ absorbida por sus bosques, sabanas, selvas, entre otros ecosistemas, y en la creación y aplicación de regulaciones legislativas a favor de la conservación de áreas verdes que actúan como sumideros naturales de carbono; de esta manera se han beneficiado del mercado, con lo que han favorecido tanto a la economía de sus países como a la preservación del ambiente, contribuyendo a la lucha contra el calentamiento global (Hernández y Marmolejo, 2000).

Estimación de carbono en la vegetación

Existen diferentes métodos que estiman la cantidad de carbono que puede absorber la vegetación de un lugar durante un momento determinado, aunque ninguno de ellos ha sido estandarizado, dado que en cada zona de estudio se deben hacer las consideraciones correspondientes al sector. Cualquiera que sea el modelo usado, es importante determinar la biomasa presente en el sector y posteriormente el contenido de car-

bono en el tejido vegetal de la misma, con la finalidad de determinar el carbono contenido en la zona de estudio (Hernández y Marmolejo, 2000).

Para determinar la biomasa aérea existen dos métodos: i) el directo o destructivo, que se basa en el corte a ras del suelo y secado de las plantas para calcular la cantidad total de materia orgánica de un lugar; y ii) el método indirecto, que se estima mediante ecuaciones matemáticas denominadas alométricas, realizando la regresión entre variables tomadas en la zona de estudio y valores reportados en inventarios forestales (Schlegel, 2001).

Las ecuaciones alométricas relacionan las dimensiones del fuste con el resto del material vegetal (en el caso de los árboles), son de suma importancia para predecir el crecimiento forestal y la captura de carbono por árbol o sistema que conforma. Las ecuaciones pueden generarse para especies particulares o para un grupo, dependiendo de la similitud de los patrones morfológicos de crecimiento que presente la vegetación del sector (Acosta, *et al.*, 2002). Una ecuación general para determinar la biomasa es la siguiente:

$$\text{Biomasa} = a + b * \text{DAP} \quad (1)$$

Donde a y b son los coeficientes de regresión dependientes del bosque y DAP es el diámetro a la altura del pecho de la especie (diámetro a una altura de 1,3 metros a partir del suelo), (Brown, 1997). Por ejemplo, en bosques húmedos de la zona atlántica de Costa Rica se utilizó para las especies *Pentaclerthra macroloba* (uña de gavilán) y *Cordia alliodora* (pardillo), para individuos con DAP mayores a 10 cm y menores a 80 cm (Chacón *et al.*, 2007):

$$Y = \exp (-2,134 + 2,530*\ln(D)) \quad (1,1)$$

Siendo Y: biomasa seca por árbol en kilogramos; D: diámetro a la altura del pecho en cm.



Existen además varios métodos que estiman la fracción de carbono en plantas, siendo el método calorimétrico el más usado debido a la facilidad y bajo costo en la aplicación del mismo. Este método se basa en la energía que una planta requiere para fijar un mol de carbono en forma de CO₂ en el proceso de fotosíntesis. Mediante un calorímetro adiabático se puede determinar la cantidad de energía invertida en el desarrollo del árbol proveniente de la combustión de la muestra (Segura, 1997 citado por Cubero y Rojas, 1998).

La acumulación de carbono de un bosque se determina mediante la siguiente fórmula:

$$CA = Bt * Fc \quad (2)$$

Donde:

CA: carbono acumulado (t C/ha);

Bt: biomasa total (t/ha);

Fc: fracción o contenido de carbono (Mora, 2001).

Valoración económica del servicio ambiental secuestro de carbono

Los bienes y servicios ambientales poseen diferentes valores económicos: en primer lugar están los valores de uso (interacción de los seres humanos con los ecosistemas) y en segundo lugar los valores de no uso (viabilidad del ecosistema en el futuro). El valor de uso de los recursos naturales se divide a su vez en directo e indirecto; los directos son aquellos que generan un bien que es usado por los humanos (madera, agua, turismo, etc); los indirectos son aquellos servicios que provienen de las funciones biológicas de los ecosistemas y bienes ambientales por los cuales los seres humanos son favorecidos de manera indirecta, como: fijación de carbono, ciclo hídrico, ciclo de nutrientes, entre otros (Cristeche y Penna, 2008).

Existen diferentes fórmulas para estimar cada uno de los valores económicos antes descritos, entre éstos se encuentran los métodos directos, indirectos y de valoración no-mercado. Los métodos directos son aquellos que permiten dar un valor estipulado por precios de mercado, por relaciones con costos o beneficios cuantificables económicamente y fórmulas o modelos que determinen el beneficio del servicio (ejemplo de dicho método: secuestro de carbono, nitrógeno fijado, conservación de suelos, entre otros). Los métodos indirectos infieren la valoración a partir de un hecho ocurrido a partir de la observación de su conducta en el mercado; y los métodos de valoración no-mercado son aquellos en los que se aplican otros instrumentos diferentes a los estipulados en mercados, como el método de valoración contingente (basados en encuestas hipotéticas), método de valoración hedónica y método de costo de viaje. Estos métodos no se pueden usar de manera aleatoria para valorar económicamente un servicio ambiental. Para el valor de uso directo se puede utilizar cualquier método disponible que permita su valoración; para valorar los servicios de uso indirecto se puede hacer el uso de métodos de valoración contingente, basados en costos, entre otros, y para valorar servicios de no uso se utilizan comúnmente los métodos de valoración contingente (Cristeche y Penna, 2008).

Área de estudio y método

Área de estudio

El Parque Nacional Waraira Repano está ubicado en el tramo central de la Cordillera de la Costa de Venezuela. Fue decretado Parque Nacional en 1958 con la intención de proteger las zonas boscosas de la capital del país, con un área aproximada de 81.800 hectáreas. El parque comprende diversos ecosistemas distribidos en un gradiente altitudinal entre 120 m.s.n.m. en la parte más baja y 2.765 m.s.n.m. en el Pico Naiguatá, que es su punto más alto. Algunos de los ecosistemas que comprende



incluyen: herbazales secundarios, vegetación xerófila (especies de arbustos, cardonales y espinares en las zonas bajas del lado norte), bosques deciduos tropófilos seguidos por bosques semi-deciduos estacionales, bosques submontanos siempreverdes, selvas nubladas, vegetación característica de sub-páramo y selvas de galería ubicadas a lo largo de los cursos de agua (Parks Watch, 2012).

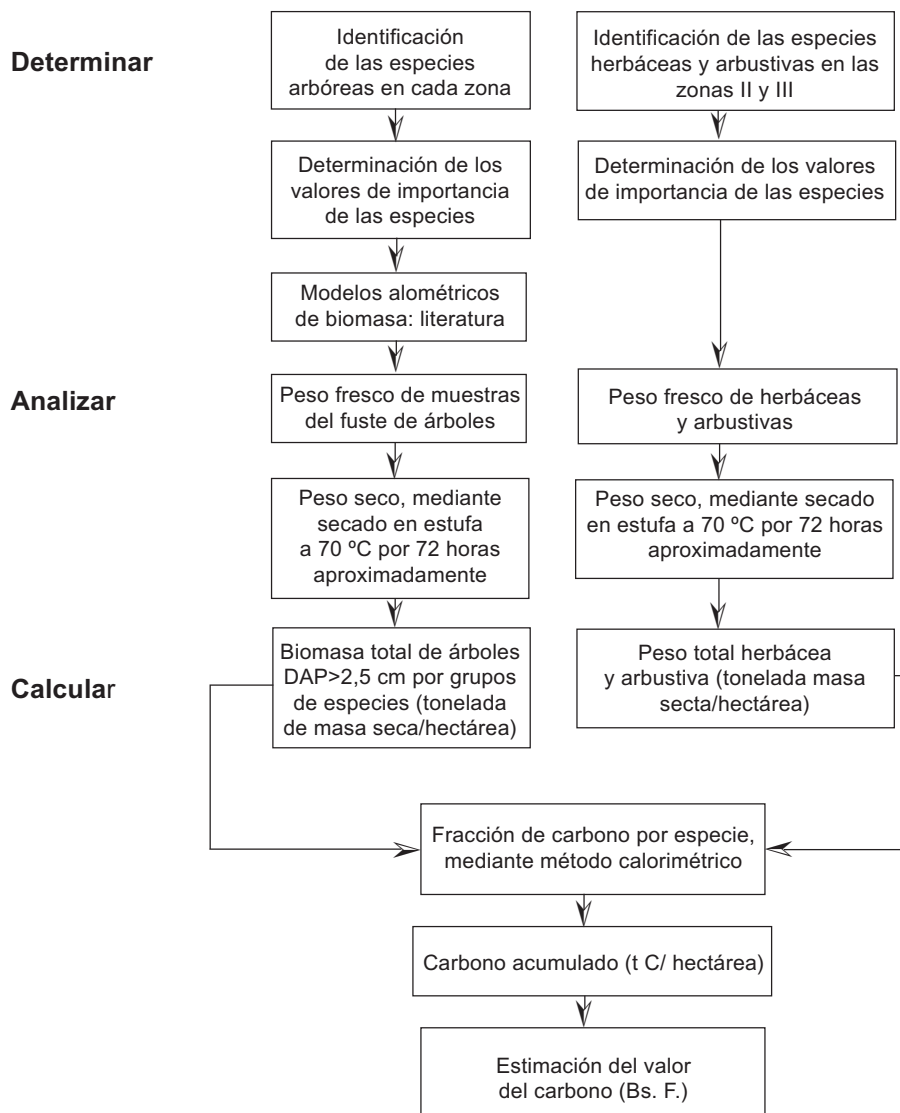
El estudio se realizó en un área de 10,6 hectáreas comprendida entre las quebradas Baquira y Galindo del Parque, y delimitada entre las coordenadas geográficas: 10° 29' 57, 82" – 10° 30' 29,56" latitud norte y 66° 47' 05, 56" – 66° 46' 54, 05" longitud oeste, y con una altitud aproximada de 1.475 m.s.n.m.

A su vez, el sector en estudio se dividió en tres zonas, enumeradas desde la parte más baja de la ladera y dependiendo del tipo de vegetación predominante; en cada una de ellas se estableció un área para muestreo, con el objeto de determinar la estructura y composición florística de la vegetación. La zona I tenía un área estimada de 5,56 ha, con una pendiente media de 28% y caracterizada por un bosque de galería semideciduo, que ocupaba un vallecito coluvio-aluvial. La zona II presentaba un área y pendiente promedio de 2,34 ha y 33% respectivamente, caracterizada por la presencia de vegetación herbácea con predominio de *Melinis minutiflora* (capín melao) y de un estrato arbóreo muy disperso. Por último la zona III, con un área de 2,69 ha y una pendiente de 38%, ubicada en la parte más alta de la ladera y cerca del poblado Santa Rosa, en la cual la vegetación natural había sido sustituida por cultivos de helechos y girasoles, y plantaciones de eucaliptos.

Método

La siguiente figura 1 muestra los pasos desarrollados para el cumplimiento de los objetivos propuestos en la investigación.

FIGURA 1
FLUJOGRAMA RESUMEN PARA ESTIMACIÓN DE LA FIJACIÓN
DE CARBONO EN EL SECTOR





En primer lugar se identificaron las variables de campo necesarias para la estimación del carbono total mitigado por la vegetación de la zona de estudio, tales como densidad absoluta e índice de valor de importancia (IVI) de la vegetación en las tres zonas de estudio, biomasa aérea de árboles y especies herbáceas, y contenido de carbono de las especies muestreadas. Dadas las condiciones topográficas, que dificultaban notablemente el acceso a los sitios de muestreo, se escogió el método de análisis de la comunidad mediante transectas, denominado “vecino más cercano” o “pares al azar”, acoplando las distancias entre puntos de acuerdo con los biotipos predominantes y la densidad de la cubierta vegetal observable en cada sector (Franco *et al.*, 1992). La identificación de las especies se realizó mediante la toma de muestras botánicas y la consulta con personal especializado. Identificada la especie se midió su diámetro a la altura del pecho (DAP, a 1,3 m del suelo), considerando sólo árboles o arbustos con $DAP \geq 2,5$ cm.

El muestreo se realizó durante la época seca correspondiente a los meses de enero a abril, e incluyó un total de 100 individuos leñosos en la zona I; además se identificaron otras especies que no estaban en las transectas, con el objeto de lograr una mejor descripción de la diversidad vegetal en el área. Con las distancias planta-planta medidas en los puntos de muestreo se estimaron los valores relativos por especie, de la densidad (dR), dominancia o cobertura (DR) y frecuencia (FR), cuya suma expresa el índice de valor de importancia ecológica (IVI) para cada especie en la comunidad.

En la zona II se emplearon cuatro parcelas distanciadas a seis metros entre sí, con 1 m² cada una. Las mismas se dividieron a su vez en cuatro cuadrantes de 0,5 X 0,5 metros, lo que resultó en 16 puntos de muestreo de 0,25 m² cada uno. En las gramíneas se midió la circunferencia basal de las macollas, o el diámetro basal en el caso de plantas herbáceas, mientras que en el caso de árboles o arbustos que aparecieron en el muestreo, se midió el DAP siempre que éste fuera igual o mayor a 2,5 cm.

La biomasa de árboles fue determinada mediante el uso de ecuaciones alométricas reportadas en la literatura científica para algunas de

las especies presentes en las zonas de estudio (método indirecto). Lamentablemente no se encontraron ecuaciones alométricas para todas las especies identificadas, por lo tanto solo se estimó la biomasa de seis especies de árboles, utilizando cuatro ecuaciones que se muestran en la Tabla 1:

La biomasa de las plantas herbácea y arbustos se determinó a través del método directo, mediante el corte a ras del suelo de individuos de especies ecológicamente importantes en la zona II y para los cultivos de helechos en la zona III.

TABLA 1
ECUACIONES ALOMÉTRICAS USADAS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA
AÉREA DE CIERTAS ESPECIES PRESENTES EN EL ÁREA DE ESTUDIO

Especies	Ecuación alométrica	Fuente bibliográfica
<i>Pentaclethra maculosa</i> y <i>Cordia alliodora</i>	$Y = \exp(-2,13 + 2,53(D^2))$ Y: Biomasa seca por árbol en kg; D: diámetro a la altura del pecho en cm	Chacón <i>et al.</i> (2007)
<i>Cecropia peltata</i> , <i>Bursera simaruba</i> y <i>Swietenia microphylla</i>	$Y = 42,69 - 12,80(D) + 1,24(D^2)$ Y: biomasa seca por árbol en kg; D: diámetro a la altura del pecho en cm	Brown (1997)
<i>Guazuma ulmifolia</i>	$\ln(\text{biomasa}) = -2,2331 + 1,4388 \cdot \ln(DAP) + 0,7979 \cdot (H)$ biomasa seca del fuste en kg/árbol; DAP: diámetro a la altura del pecho en cm y H: altura en metros	Hughell (1990)
Especies de <i>eucalyptus</i>	$\ln(\text{biomasa}) = -4,35252 + 3,00509 \cdot \ln(DAP)$ biomasa del fuste seco en kg/árbol, DAP: diámetro a la altura del pecho, en cm.	Ferrere <i>et al.</i> (2008)

Para la determinación del índice carbono retenido en la vegetación se tomaron muestras de tejido leñoso por duplicado en el fuste de los



árboles de las especies más importantes de cada zona de estudio, posteriormente las muestras fueron secadas en el laboratorio para determinar la biomasa seca y el índice de carbono de todos los individuos mediante método calorimétrico. El contenido de carbono para las especies herbáceas también fue realizado por duplicado para cada muestra. En todos los casos se consideraron sólo las especies que aparecieron en las transectas para análisis de la vegetación.

Obtenida la biomasa seca promedio y los índices de carbono en base seca para las especies arbóreas, se determinó el carbono fijado mediante la siguiente fórmula:

$$Cf = B * Cf * dae$$

Siendo Cf: carbono fijado por la especie en toneladas de carbono por hectárea (t C/ha); B: biomasa seca del fuste o total dependiendo de la especie utilizada (valor proveniente de las ecuaciones alométricas) en toneladas/árbol; Cf: índice de carbono seco promedio del fuste de la especie; y dae: densidad absoluta de la especie arbórea en árbol/hectárea.

Para las especies herbáceas, el carbono promedio fijado fue convertido a toneladas y multiplicado por la densidad absoluta de la especie, generando acumulación de carbono por hectárea según la siguiente fórmula:

$$CA = dae * Ct$$

Siendo CA: carbono acumulado por la especie en toneladas de carbono por hectárea (t C/ha); dae: densidad absoluta de la especie en plantas/ha; Ct: Carbono promedio fijado en toneladas de carbono/plantas

El carbono fijado por cada especie en la zona correspondiente fue llevado a toneladas de CO₂ equivalente, mediante la relación de los pesos molares correspondientes al carbono y al CO₂:

$$CO_2\text{equi} = CA * 44\text{molesCO}_2/12\text{molesC}$$

Siendo $CO_2\text{equi}$: toneladas por hectáreas de CO_2 ; CA: carbono acumulado por la especie.

Finalmente se determinó el valor económico de secuestro de carbono del área de estudio tomando como referencia el precio promedio, desde el año 2010 hasta el año 2013, del valor de los Derechos de Emisión de la Unión Europea (EUA) reflejados en la Bolsa del Sistema Electrónico de Negociación de Derechos de Emisión de Dióxido de Carbono (SENDECO₂, 2013), el cual fue de 9,73 € por tonelada de CO_2 equivalente.

La siguiente expresión determina el valor económico del carbono mitigado en el área de estudio:

$$Ve_{US\$} = CO_2\text{equi} * AE * V_{\text{carbono}} * \$$$

Siendo $Ve_{US\$}$: valor económico en dólares americanos; $CO_2\text{equi}$: toneladas por hectáreas de CO_2 ; AE: Área de cada zona de muestreo hectáreas; V_{carbono} : precio del CO_2 equivalente promedio; y \$: tasa de cambio dólar-euro (1,3660 US\$/€).

Resultados y discusión

Análisis de la vegetación en las zonas estudiadas

Los resultados del muestreo en la Zona I (bosque de galería) indicaron la presencia de 15 especies de árboles (Tabla 2). Los valores reflejaron un área media por planta estimada en 4,05 m², de manera que la densidad total en dicha zona es aproximadamente 2.468 plantas/ha, comprendiendo aquellos individuos con diámetro a la altura del pecho (DAP) mayor de 2,5 cm.



TABLA 2
ÍNDICE DE VALOR DE IMPORTANCIA (IVI) DE LA VEGETACIÓN DE LA ZONA I

Especie	Frecuencia relativa (%)	Densidad relativa (%)	Dominancia relativa (%)	IVI (%)
<i>Pentaclethra macroloba</i>	14,100	13,640	25,960	53,690
<i>Cecropia peltata</i>	12,820	12,500	23,090	48,410
<i>Machaerium robiniaefolium</i>	11,540	10,230	12,060	33,820
<i>Bursera simaruba</i>	12,820	13,640	3,322	29,780
<i>Cordia alliodora</i>	10,260	11,360	5,603	27,220
<i>Leucaena trichodes</i>	10,260	10,230	2,596	23,080
<i>Urera baccifera</i>	6,410	7,955	4,271	18,640
<i>Clitoria fairchildiana</i>	6,410	5,682	2,967	15,060
<i>Clusia grandiflora</i>	1,282	1,136	10,270	12,690
<i>Guazuma ulmifolia</i>	3,846	4,545	1,806	10,200
<i>Swietenia macrophylla</i>	2,564	2,273	3,969	8,806
<i>Albizia sp.</i>	2,564	2,273	2,252	7,088
<i>Bauhinia guianensis</i>	2,564	2,273	0,109	4,946
<i>Helio carpus americano</i>	1,282	1,136	1,595	4,013
<i>Cassia moschata</i>	1,282	1,136	0,142	2,561

Acorde con los valores mostrados en la Tabla 2, la especie con mayor índice de valor de importancia (IVI) es *Pentaclethra macroloba* (uña de gavián), ya que la misma presentó el mayor número de individuos (mayor valor de densidad relativa), una buena distribución indicada por su alta frecuencia relativa, así como la mayor cobertura, expresada mediante la dominancia relativa. Sin embargo, *Cecropia peltata* L. (yagrumo) puede considerarse como codominante, debido a que los valores de los componentes del IVI resultaron sólo ligeramente inferiores a los de *P. macroloba*.

La densidad de la vegetación de la Zona II se estimó en 192,5 plantas/ha, obteniéndose según los valores del IVI (Tabla 3), como especie dominante por número de individuos, distribución y sobre todo por su cobertura, a *Melinis minutiflora* Beauv. (capín melao), mientras que la especie

P. odorata Cass, la cual presentó una distribución y número de individuos alto, pero una baja dominancia, se ubicó en segundo lugar.

TABLA 3
ÍNDICE DE VALOR DE IMPORTANCIA (IVI) DE LA VEGETACIÓN DE LA ZONA II

Especies	Frecuencia relativa (%)	Densidad relativa (%)	Dominancia relativa (%)	IVI (%)
<i>Melinis minutiflora</i> Beauv.	38,095	48,052	93,400	179,547
<i>P. odorata</i> Cass	30,952	28,571	0,949	60,472
<i>Pennisetum purpureum</i> S.	19,048	14,286	4,923	38,256
"Compositae"	7,143	6,494	0,240	13,877
"Guayaba"	4,762	2,597	0,488	7,848

Aunque no se pudo llevar a cabo el estudio exhaustivo en la Zona III, la comunidad de Santa Rosa proporcionó datos de las plantaciones presentes, como distancia promedio entre hileras y distancia promedio entre árboles o hierbas (caso de helechos). Las especies cultivadas en la zona son principalmente helechos y eucaliptos, siendo sus densidades 100.000 plantas/ha y 10.000 plantas/ha, respectivamente. No se pudo identificar científicamente los nombres específicos de los helechos y eucaliptos que se cultivan en la zona. Pero en el último caso, como se trató de dos especies diferentes, las muestras se distinguieron con los nombres A y B.

Biomasa aérea de las especies

De las 15 especies presentes en la bosque de galería, sólo se pudo determinar la biomasa de seis (06) de ellas a través de ecuaciones alométricas, así como la biomasa de las plantaciones de eucaliptos de la zona III. Estos valores se reportan en la Tabla 4. Las especies de mayor biomasa aérea total fueron *Pentaclerthra macroloba* con 730,46 kg, seguida por *Cecropia peltata* con 497,13 kg y *Swietenia microphylla* con 468,45 kg.



TABLA 4
BIOMASA SECA PROMEDIO GENERADA A PARTIR DE ECUACIONES ALOMÉTRICAS

Especies	Zona	Biomasa promedio en base seca (Kg/árbol)
<i>Pentaclethra maculoba</i>	I	730,460
<i>Cecropia peltata</i>	I	497,130
<i>Bursera simaruba</i>	I	38,689
<i>Cordia alliodora</i>	I	139,670
<i>Swietenia macrophylla</i>	I	468,450
<i>Guazuma ulmifolia</i>	I	4,960
<i>Eucalipto A</i>	III	5,7997
<i>Eucalipto B</i>	III	7,3768

La Tabla 5 presenta la biomasa en base seca de las especies presentes en la Zona II y de los helechos cultivados en la Zona III.

TABLA 5
BIOMASA EN BASE SECA DE LA VEGETACIÓN DE LAS ZONAS II Y III

Especie	Zona	Componente	Biomasa seca de muestra (g)
<i>P. odorata</i> Cass	II	Hojas	2,897
		Ramas	0,705
		Tallo	13,460
<i>Melinis minutiflora</i>	II	Culmo	23,720
<i>Pennisetum purpureum</i> S.	II	Culmo	4,999
"Guayaba"	II	Hojas	5,278
		Tallo	6,597
"Compositae"	II	Hojas	7,774
		Tallo	37,660
Helechos	III	Raquis	2,11
		Fronchas	1,97

Índice de carbono y CO₂ fijado

El contenido de carbono de las especies muestreadas determinado por el método calorimétrico, así como el carbono fijado por hectáreas y el CO₂ equivalente de la zona I, se presentan en la Tabla 6. Cabe destacar que los contenidos de carbono obtenidos concuerdan con valores reportados por otros autores para especies forestales de bosques tropicales (Cubero y Rojas, 1999; Ferreira, 2001).

TABLA 6
CARBONO ACUMULADO POR LAS ESPECIES DEL BOSQUE DE GALERÍA

Especies	Contenido de carbono (%)	Biomasa promedio (Kg/árbol)	Densidad absoluta (árboles/ha)	Carbono fijado (t C/ha)	CO ₂ equivalente (t CO ₂ equi/ha)
<i>Pentaclethra macroloba</i>	0,4356	730,460	336,610	107,110	392,737
<i>Cecropia peltata</i>	0,4206	497,130	308,560	64,517	236,560
<i>Bursera simaruba</i>	0,4439	38,689	336,610	5,781	21,200
<i>Cordia alliodora</i>	0,4534	139,670	280,510	17,764	65,135
<i>Swietenia macrophylla</i>	0,4019	468,450	56,102	10,562	38,727
<i>Guazuma ulmifolia</i>	0,4655	4,960	112,200	0,259	0,950
CO₂ total (t CO₂ equi/ha)					755,310

De la tabla anterior se puede observar que la especie que fijó más carbono fue *Pentaclethra macroloba* con 107 t C/ha; esto se debe a que la biomasa promedio y la densidad absoluta de la especie fue mayor en comparación con las demás; mientras que la especie *Guazuma ulmifolia* obtuvo un valor estimado de carbono fijado en 0,2591 t C/ha. Este valor tan bajo en comparación con otras especies se debe que sólo se estimó



el peso del fuste, por lo que el valor sólo indica la acumulación de carbono en dicho componente.

Por su parte, la tabla 7 presenta la acumulación de carbono y la cantidad de CO₂ equivalente mitigada para cada una de las especies de la zona II.

TABLA 7
ACUMULACIÓN DE CARBONO DE LAS ESPECIES EN LA ZONA II

Especie	Contenido de carbono (gr de carbono)	Densidad absoluta (plantas/ha)	Acumulación de carbono (t carbono/ha)	CO ₂ equivalente (t CO ₂ equi/ha)
<i>P. odorata</i> Cass	2,5479	55.000	0,1401	0,51
<i>Melinis minutiflora</i>	10,0530	92.500	0,9299	3,41
<i>Pennisetum purpureum</i>				
<i>Schumach</i>	2,1060	27.500	0,0579	0,21
"Guayaba"	2,6370	5.000	0,0132	0,05
"Compositae"	10,3150	12.500	0,1289	0,47
CO₂ total (t CO₂ equi/ha)				4,66

La fijación de carbono fue mayor para la especie *Melinis minutiflora* debido a que la misma posee una mayor cantidad de biomasa y densidad absoluta en la zona. En segundo lugar, la especie *P. odorata* obtuvo un mayor contenido de carbono, pero la densidad fue mucho menor en comparación a *Melinis minutiflora* (capín melao), lo que determinó una fijación mucho menor.

En el caso de la Zona III, se calculó el carbono fijado por los componentes de las muestras de helechos, y por las dos especies de eucalipto reportados. Las tablas 8 y 9 presentan los contenidos promedio de carbono y la cantidad de CO₂ equivalente para helechos y árboles de eucalipto respectivamente: Cabe destacar que en el caso de los índices de carbono obtenidos para las especies de eucaliptos, fueron similares

a los valores reportados para plantaciones de eucaliptos y laurel (*Coridia alliodora*) por Cubero y Rojas (1999). Finalmente, la cantidad de carbono mitigado en la Zona III fue de 108,90 t CO₂ equi/ha.

TABLA 8
ACUMULACIÓN DE CARBONO DE LA PLANTACIÓN DE HELECHOS

Especie	Contenido de carbono (gr de carbono)	Densidad absoluta (plantas/ha)	Acumulación de carbono (t Carbono/ha)	CO ₂ equivalente (t CO ₂ equi/ha)
Helecho	0,9416	100.000	0,0942	0,691

TABLA 9
CARBONO ACUMULADO POR LA ESPECIE EUCALIPTO EN LA PLANTACIÓN

Especie	Índice de carbono (kg/kg seco C)	Biomasa fuste (kg seco/árbol)	Densidad (planta/ha)	Carbono acumulado (t C/ha)	CO ₂ equivalente (t CO ₂ equi/ha)
Eucalipto A	0,4701	5,7997	5.000	13,634	58,250
Eucalipto B	0,4307	7,3768	5.000	15,886	49,990

Se logró estimar que el área de estudio almacena en la biomasa aérea vegetal al menos 4.503,45 toneladas métricas de CO₂ equivalente (868,9 t CO₂ /ha), siendo las especies que contribuyen mayormente *Pentaclethra macroloba* (con casi 50%), *Cecropia peltata*, *Bursera simaruba*, *Eucalyptus A*, *Eucalyptus B*. El bosque de galería fue la zona de mayor importancia en cuanto almacenamiento de carbono debido a la cantidad y tipo de especies arbóreas presentes; en segundo lugar se encuentran las plantaciones de eucalipto y por último la ladera, donde domina el capín melao, lo cual resulta lógico ya que la vegetación herbácea, aunque tiene alta densidad de especies y número de individuos, no son grandes acumuladores de carbono dada su baja biomasa.



Valor económico del carbono fijado

El estimado de las toneladas métricas de CO₂ equivalente fijado en cada zona fue valorado económicamente usando el precio de 9,73 €/T de CO₂ equivalente correspondiente al promedio de los precios reflejados en la Bolsa del Sistema Electrónico de Negociación de Derechos de Emisión de Dióxido de Carbono (Sendeco₂, 2013) desde el año 2010 hasta el año 2013 (Tabla 10).

El valor económico del servicio ambiental de secuestro de carbono en el área de estudio fue de 59.856,15 US\$. La valoración realizada representa una estimación parcial del área en cuanto a secuestro de carbono, considerando que no fue posible calcular el aporte de otras especies presentes en el área por no disponer de ecuaciones alométricas referidas en la literatura científica; además, no se consideró a los individuos con un DAP menor a 2,5 cm, ni la acumulación del compuesto en las raíces y en suelo del área, por lo tanto el valor de este servicio ambiental podría ser mayor.

TABLA 10
VALOR ECONÓMICO DEL CARBONO FIJADO POR ESPECIES
DEL BOSQUE DE GALERÍA

Zona	I Bosque de galería	II Vegetación graminosa	III Plantaciones
CO ₂ total (t CO ₂ equi/ha)	755,31	4,66	108,93
Área bosque galería (ha)	5,56	2,34	2,69
Valor económico del CO ₂ (US\$)	55.816,62	144,93	3.894,60
Valor de CO ₂ equivalente (US\$/ha)	10.038,96	61,94	1.447,81

Conclusiones

Del estudio de las especies comprendidas en la zona de trabajo para determinar la capacidad de fijación de carbono y su valoración



económica, se corroboró que el carbono fijado en la biomasa vegetal es mayor si ésta y la densidad absoluta que presentan las especies es alta, por lo que las especies arbóreas presentan mayor cantidad de carbono acumulado con respecto a los arbustos y planta herbáceas.

El valor económico del carbono en el área estudiada fue de 59.856,15 US\$, en la cual se mitigan más de 800 toneladas métricas de CO₂ equivalente /ha. De acuerdo con estos valores, se puede indicar que la recuperación y mantenimiento de bosques brinda mayores beneficios económicos que los pastizales; es por ello que esfuerzos en controlar incendios forestales y planes de reforestación se compensarían con el pago del servicio ambiental (fijación de CO₂).



Referencias

- ACOSTA, M.; ETCHEVERS, J.D.; VARGAS, J. y VELÁZQUEZ, A. (2002). *Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México*. Colegio de Postgraduados. Texcoco, México.
- BROWN, S. (1997). "Estimating biomass and biomass change of tropical forests", *Rome: FAO, Forestry Paper 134*. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/W4095E/w4095e06.htm#3.3%20biomass%20estimates%20of%20individual>.
- CHACÓN L., M.; HARVEY, C. y DELGADO, D. (2007). "Diversidad arbórea y almacenamiento de carbono en un paisaje fragmentado del bosque húmedo de la zona atlántica de Costa Rica". *Recursos Naturales y Ambiente* 51-52(2007):19-32
- CRISTECHE, E. y PENNA, J. (2008). *Análisis socioeconómico de la sustentabilidad de los sistemas de producción y de los recursos naturales. Métodos de valoración económica de los servicios ambientales*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, N° 3.
- CUBERO, A. y ROJAS, S. (1999). *Fijación de carbono en plantaciones de melina, teca y pochote en los cantones de Hojancha y Nicoya. Guanacaste, Costa Rica*. Trabajo de grado Universidad Nacional. Costa Rica.
- FERREIRA (2001). *Almacenamiento de carbono en bosques secundarios en el municipio de San Carlos, Nicaragua*. Programa de Enseñanza para el Desarrollo y la Conservación. Escuela de Postgraduados. Tesis de Maestría. CATIE. Turrialba, Costa Rica.
- FERRERE, P.; LUPI, A.M.; BOCA, R.; NAKAMA, V. y ALFIERI, A. (2008). *Biomasa en plantaciones de Eucalyptus viminalis labill de la provincia de Buenos Aires, Argentina*. Universidad Federal de Santa María. Santa María, Brasil.
- FRANCO, J.; CRUZ, G.; CRUZ, A.; ROCHA, A.; NAVARRETE, N.; FLORES, G.; KATO, E.; SÁNCHEZ, S.; ABARCA, L. y BEDIA, C. (1992). *Manual de ecología*. México: Editorial Trillas.
- HERNÁNDEZ, E. y MARMOLEJO, J. (2000). *Análisis económico del servicio ambiental de fijación de carbono, en las plantaciones forestales Earth-Rotterdam*. Tesis de Grado. Costa Rica.



- HUGHELL, DAVID (1990). *Modelos para la predicción del crecimiento y rendimiento de: Eucalyptus camaldulensis, Gliricidia sepium, Guazuma ulmifolia y Leucaena leucocephala en América Central*. Costa Rica: CATIE, 59 p.
- LAGOS, O. y VANEGAS, S. (2003). *Impacto del aprovechamiento forestal en la biomasa y carbono de bosques naturales de Nueva Quezada, río San Juan*. Managua, Nicaragua.
- MINISTERIO DEL AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (2005). *Primera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático en Venezuela*. Caracas.
- MORA, V. (2001). *Fijación, emisión y balance de gases de efecto invernadero en pasturas en monocultivo y en sistemas silvopastoriles de fincas lecheras intensivas de las zonas altas de Costa Rica*. Turrialba, Costa Rica.
- PANEL INTERGUBERNAMENTAL DE EXPERTOS SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO-IPCC. (2008). *Glosario*. Disponible en: http://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/ccw/ccw%20sp/appendix_2_sp.pdf
- PARKS WATCH (2012). *Venezuela: Parque Nacional El Ávila*. Caracas. Disponible en: http://www.parkswatch.org/parkprofiles/pdf/avn_p_spa.pdf.
- SCHLEGEL, B. (2001). *Estimación de la biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempreverde*. Valdivia, Chile.
- SENDECO₂ (2013). *Sistema Electrónico de Negociación de Derechos de Emisión de Dióxido de Carbono*. Disponible en: <http://www.sendeco2.com/>
- SEOÁNEZ, M. (2002). *Tratado de la contaminación atmosférica*. Madrid: Mundi-Prensa Libros, S.A.
- SOLÍS, S. (1998). *Valoración económica del almacenamiento y fijación de carbono en un bosque subhúmedo estacional de Santa Cruz, Bolivia*. Programa de enseñanza para el desarrollo y la conservación. Escuela de Post-graduados. CATIE. Tesis de Maestría. Turrialba, Costa Rica.
- UNFCCC (2008). *Kyoto Protocol Reference Manual*.
- WWF PROGRAMA INTERNACIONAL ÁRTICO (2009). *Resultados del clima ártico: implicaciones globales*. Disponible en: <http://www.alertatierra.com/resultados%20del%20clima%20artico,%20implicaciones%20globales.pdf>