

Biomasa sobre el suelo y carbono orgánico en el suelo en cuatro estadios de sucesión de bosques en la Península de Osa, Costa Rica

Heileen Aguilar-Arias¹
Edgar Ortiz-Malavassi²
Braulio Vílchez-Alvarado²
Robin L. Chazdon³

Resumen

Para este estudio se cuantificó la biomasa seca acumulada en la capa de mantillo sobre el suelo y en la madera muerta, así como el contenido de carbono orgánico en el suelo (COS), en cuatro estadios de sucesión de bosque: 5 a 15 años, 15 a 30 años, mayores de 30 años y bosque primario. Se estableció un diseño simple aleatorio con sub-muestreo, cuatro tratamientos (estadio sucesional), cinco repeticiones (PPM) y cuatro muestras por PPM. La biomasa acumulada en la capa de mantillo fue mayor en bosques primarios con 9,75 t/ha, seguido por bosques mayores de 30 años con 7,93 t/ha, bosques de 15-30 años con 5,97 t/ha y por último bosques de 5-15 años con 5,60 t/ha. Los valores de biomasa en la madera muerta fueron de 7,80 t/ha en bosques primarios, 3,26 t/ha en bosques mayores de 30 años, 5,84 t/ha, en bosques de 15-30 años y de 3,42 en bosques de 5-15 años. El carbono orgánico almacenado en el suelo fue mayor en bosques de más de 30 años (109,24 tC/ha), seguido por bosques primarios (92,29 tC/ha), 15-30 años (88,01 tC/ha) y por último bosques de 5-15 años (78,48 tC/ha⁻¹). Se encontraron diferencias estadísticas ($\alpha = 0,05$) en la biomasa de mantillo acumulada en bosques primarios respecto a bosques de 5-15 años. Las tendencias mostraron un aumento en la cantidad de biomasa acumulada en la capa de mantillo conforme aumenta el estadio sucesional. La biomasa de madera muerta no mostró diferencias estadísticas respecto a la edad del bosque ($\alpha = 0,05$). El carbono orgánico en el suelo (COS) mostró diferencias estadísticas ($\alpha = 0,05$) en bosques de 5-15 años respecto a bosques mayores de 30 años.

Abstract

For this study quantified the amount of dry biomass accumulated in litter, dead wood biomass and the amount of soil organic carbon (SOC) in four forest successional stages: 5 to 15 years, 15 to 30 years, over 30 years old and primary forest. A simple random design with sub-sampling, four treatments (successional stage), five repetitions (PPM) and four samples per PPM was established. The accumulated biomass in litter was higher in primary forests with 9,75 t ha⁻¹, followed by forests over 30 years with 7,93 t ha⁻¹, 15-30 years with 5,97 t ha⁻¹ and finally forests 5-15 years with 5,60 t ha⁻¹. The values of biomass in dead wood were of 7,80 t ha⁻¹ in primary forests, 3,26 t ha⁻¹ in forests older than 30 years, 5,84 t ha⁻¹ in 15-30 year forests and 3,42 t ha⁻¹ in 5-15-year forest. The soil organic carbon was higher in forests over 30 years (109,24 tC ha⁻¹), followed by primary forest (92,29 tC ha⁻¹), 15-30-year forest (88,01 tC ha⁻¹); lastly, 5-15-year forest (78,48 tC/ha⁻¹). There were statistical differences ($\alpha = 0,05$) in biomass of accumulated litter on forest forests 5-15 years. The trends show an increase in the amount of biomass accumulated in litter with increasing successional stage. Dead wood biomass showed no statistical differences in age of the forest ($\alpha = 0,05$). The soil organic carbon (SOC) showed statistical differences ($\alpha = 0,05$) in forests of 5-15 years for forests older than 30 years.

1. Egresada Ing. Forestal - Instituto Tecnológico de Costa Rica.
heileenaguilar@gmail.com

2. Profesor e investigador - Instituto Tecnológico de Costa Rica.
Tel: (506) 2550-2279 eortiz@itcr.ac.cr

2. Profesor-investigador del Instituto Tecnológico de Costa Rica.
Tel: (506) 2550-2288, bvilchez@itcr.ac.cr

3. Profesora-Investigadora Departamento de Ecología y Biología
Evolutiva Universidad de Connecticut.
chazdon@uconnvm.uconn.edu

Palabras clave: sucesión de bosque, cambio climático, fijación de CO₂, biomasa, mantillo, madera muerta, carbono orgánico en el suelo (COS), densidad aparente, Corredor Biológico Osa, Costa Rica.

Key words: forest succession, climate change, CO₂ fixation, biomass, mulch, dead wood, soil organic carbon (SOC), bulk density, Osa Biological Corridor, Costa Rica.

Introducción

Como producto del aumento en las concentraciones de CO₂ en la atmósfera, se ha promovido la investigación en cambio climático y uso de la tierra en los trópicos, enfocado mayormente en el análisis de los impactos de la deforestación y los efectos del uso de la tierra en las emisiones de gases de efecto invernadero; así como, la fijación biológica de carbono como un medio para reducir las concentraciones (Kanninen 2003, Houghton 2008). Los bosques tropicales resultan ser apropiados para este fin ya que combinan altas tasas de fijación de carbono con gran área disponible (Moura Costa 1996 y Ortiz *et al.* 1998, citados por Vaccaro *et al.* 2003).

En Costa Rica, el territorio ocupado por bosques naturales se calcula en un 43,5%, donde es posible hallar gran diversidad de ecosistemas, en su mayoría parches de bosque secundario y algunas áreas con permanencia de bosques viejos (Vílchez *et al.* 2009). La Península de Osa es una área donde todavía quedan bosques primarios, muy diversos, con especies que se restringen a esta zona (Vílchez y Rocha 2005). Estas áreas resultan ser importantes no solo en la conservación y protección de diversidad de especies sino en la utilización de las mismas como sumideros de carbono para el país (Segura y Kanninen 2002).

Los ecosistemas boscosos pueden funcionar como importantes sumideros de carbono debido a la cantidad de este elemento acumulado en los diversos tipos de biomasa; que se expresa como toda materia orgánica viva o muerta generada a partir de un proceso biológico (IPCC 2001). En los bosques, puede estar arriba del suelo, sobre el suelo o bien, en forma subterránea. La biomasa sobre el suelo se divide en la madera muerta y el mantillo o necromasa (IPCC 2001).

La biomasa de madera muerta es un término comúnmente empleado para referirse a las ramas derribadas, árboles muertos en pie, troncos y tocones; o bien, cualquier resto xiloso que se encuentra en los bosques (Delgado y Pedraza 2002). La madera muerta cumple un papel importante en los procesos ecológicos del bosque al ser un eslabón en el ciclo del carbono y de nutrimentos, es fuente de alimento y ofrece hospedaje a muchos insectos, animales y a otros organismos (Louman 2006).

La cantidad de madera muerta depende tanto de los ciclos de regeneración (Buxó y Piqué 2008), de la composición y estructura del bosque (Pozo *et al.* 2009), así como del uso o manejo del mismo (Delgado y Pedraza 2002).

El mantillo comprende toda la biomasa no viva con un diámetro inferior a un diámetro mínimo elegido por el país

(por ejemplo, 10 cm), que yace muerta, en varios estados de descomposición sobre el suelo mineral u orgánico, comprende las capas de detritus, fúmica y húmica. Las raíces finas vivas (de tamaño inferior al límite de diámetro sugerido para la biomasa bajo el suelo) se incluyen en el mantillo cuando no se pueden distinguir empíricamente de él (IPCC 2001).

La biomasa de mantillo y madera muerta forman parte de diversos ecosistemas boscosos y se encuentran disponibles en diferentes cantidades. Son importantes reservorios de carbono en el bosque y su acumulación depende en su mayoría, de las tasas de producción de cada tipo de comunidad vegetal y las tasas de mineralización o descomposición. Su cantidad en el ecosistema se ve igualmente regulado por el clima y el sustrato (Arnaldos *et al.* 2004).

Los ecosistemas boscosos almacenan gran parte del carbono en el suelo y la disponibilidad de este elemento en el suelo mineral se ve altamente influenciada por la biomasa aérea y por factores como la densidad aparente, la textura y la profundidad, así como por procesos de lixiviación, erosión o mineralización del suelo (IPCC 2006). Por ello, es de gran importancia cuantificar la biomasa y el carbono en los ecosistemas boscosos para tener una idea de la capacidad de almacenamiento, liberación o neutralidad del C en los mismos (Lugo y Brown 1992).

Esta investigación tuvo como objetivo determinar el aporte de biomasa seca (t/ha) que proporcionan los componentes de mantillo y madera muerta sobre el suelo (no se incluyen árboles muertos en pie); y la cantidad de carbono total (tC/ha) almacenado en el suelo, en cuatro estadios de sucesión en bosques tropicales de la Península de Osa.

Materiales y Métodos

Ubicación y descripción del área de estudio

Esta investigación se llevó a cabo en 20 parcelas permanentes de monitoreo (PPM) establecidas en el año 2009 y 2011 por parte del proyecto "Línea base de estudio de la biodiversidad, servicios ambientales y valores para la conservación de bosques secundarios y maduros en el Corredor Biológico Osa", financiado por la Fundación Blue Moon, la Universidad de Connecticut y el Instituto Tecnológico de Costa Rica. Las parcelas están ubicadas en diferentes sectores de la Península de Osa en Costa Rica: Río Piro (8°24'6,933"N, 83°20'28,847"W), Matapalo (8°23'24,873"N, 83°17'42,497'W), Los Mogos (8°44'57,275"N, 83°22'47,412"W) y Bahía Chal (8°43'24,307"N, 83°26'18,045"W).

Según la descripción realizada por Morales (2010) con base al Atlas Digital de Costa Rica 2008, los sectores de Río Piro y Matapalo presentan una precipitación promedio anual de 4500 a 5000 mm, con una estación seca de tres meses en promedio; mientras que los sectores de Los Mogos y Bahía Chal oscilan entre los 3500 y 4000 mm, con una estación seca de un mes.

Los sitios de estudio presentan dos órdenes de suelos: ultisoles con horizonte argílico e inceptisoles caracterizados por un suelo joven con horizonte B cámbico (apenas se forma B) (Morales 2010). Además estos sitios pertenecen a la zona de vida Bosque muy húmedo Tropical (bmh-T) para la mayoría de las unidades experimentales y Bosque Pluvial Premontano Transición a Basal (bp-P6) para las parcelas once y catorce (Atlas Digital de Costa Rica 2008).

Recolección y análisis de datos

En el año 2009 se definió una cronosecuencia de bosques tropicales de acuerdo a cuatro estadios sucesionales, que abarcan las edades de 5-15 años, 15-30 años, mayores de 30 años y bosque viejo o primario. Cada una de las 20 parcelas tiene un área de 5000 m² (50 x 100 m), y está dividida en sub parcelas de 10 x10 m, para un total de 50 sub-parcelas numeradas en forma consecutiva del número 1 hasta el 50.

El diseño de la investigación corresponde a un simple aleatorio con sub-muestreo, con igual número de repeticiones. Los tratamientos correspondieron a cuatro estadios de sucesión (años) con cinco repeticiones cada uno (PPM). Para el sub-muestreo se establecieron cuatro parcelas temporales en cada PPM para obtener las muestras de biomasa de mantillo, biomasa de madera muerta y las muestras de suelo, para calcular el carbono orgánico en suelo.

Biomasa sobre el suelo

La determinación de la biomasa sobre el suelo contempló la medición de mantillo y madera muerta en el suelo. La recolección de la materia vegetal depositada sobre el suelo se llevó a cabo durante los meses de febrero y marzo del 2011.

Mantillo

Se montaron cuatro parcelas circulares de 0,5 m² (40 cm de radio), en cada una de las esquinas de cada parcela de monitoreo. Se recolectó manualmente todo el material vegetal que estaba ubicado dentro del área de cada parcela circular (hojas y ramas o ramillas con menos de 10 cm de diámetro), luego se procedió a pesarlo y mezclarlo hasta lograr un material lo más homogéneo posible. De cada una de estas muestras se extrajo una submuestra representativa mayor o igual a 100 g, que fue nuevamente pesada y depositada en una bolsa de plástico para su transporte al laboratorio, ubicado en el Centro de Investigación e Integración Bosque Industria (CIIBI) del Instituto Tecnológico de Costa Rica en Cartago. Allí fueron secadas al horno a una temperatura de 100°C

durante 24 horas para luego ser pesadas y así obtener el peso seco. Para el cálculo del peso seco de las muestras de campo se utilizó la ecuación 1.

$$PS_m = k * PV_m \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

K= coeficiente de materia seca

Psub= peso seco de la submuestra

Pvsub= peso verde de la submuestra

Psm= peso seco de la muestra

Pvm= peso verde de la muestra

Madera muerta

Se instalaron cuatro parcelas circulares de 5,65 m de radio (100 m²) tomando como base las esquinas de las sub-parcelas 21, 22, 23 y 24 de cada una de las 20 parcelas permanentes. Dentro de cada unidad de submuestreo se midió toda la madera muerta (troncos, ramas, raíces, tocones, con diámetro mayor o igual a 10 cm que estuviera sobre el suelo (no se incluyó en este estudio árboles muertos en pie). Se procedió a medir las trozas cada metro de largo y medir el diámetro de las dos caras para luego calcular el volumen de cada troza como el volumen de un cilindro truncado (Ecuación 2). De cada árbol medido se tomó una muestra para determinar la densidad de la madera. Las muestras fueron llevadas al Centro de Investigación Bosque Industria (CIIBI) del Instituto Tecnológico de Costa Rica donde fueron pesadas en condición verde, seguidamente se obtuvo el volumen por el método de desplazamiento de agua y fueron llevadas al horno a 100 °C durante 24 horas (0% CH) para luego ser pesadas en seco y obtener de esta forma la densidad de la muestra (Ecuación 3). Una vez obtenida la densidad y el volumen de cada árbol medido se calculó la biomasa seca de cada muestra (Ecuación 4). Para obtener los valores de biomasa seca del componente madera en toneladas por hectárea, se efectuaron las conversiones respectivas, tomando en cuenta que las unidades de muestreo fueron de 0,01 ha.

$$V = (A_1 + A_2) \frac{L}{2} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

V= volumen de la troza Smalian (Prodan *et al.*, 1997 (cm³))

A₁ = área de la sección 1 (cm²)

A₂ = área de la sección 2 (cm²)

L= largo de la troza en (cm)

$$d = \frac{P_{seco}}{V_{verde}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

d= densidad de la muestra (g/cm³)

Pseco= peso seco de la muestra (g)

Vverde= volumen de la muestra obtenido por desplazamiento (cm³)

$$B=v*d \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

B= es la biomasa seca (g)

v= es el volumen obtenido de cada troza según la fórmula Smalian (Prodan *et al.* 1997) (cm³)

d= es la densidad de la madera obtenida a partir de la muestra de campo (g/cm³).

Carbono orgánico en el suelo

Para la determinación del carbono en el suelo se usó la fórmula propuesta por la IPCC (2006) la cual se presenta a continuación:

$$COS=(\%COS)*densidad\ aparente*profundidad*fragmentos\ gruesos*10 \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

COS= Carbono orgánico almacenado para el suelo de interés, t/ha

(%COS)= concentración de carbono orgánico en el suelo en una masa dada (a partir de los resultados de laboratorio), gC / (kg suelo)

Densidad aparente= masa de suelo por volumen de muestra, Mg/m³

Profundidad= espesor o profundidad del suelo para la muestra, m

Fragmentos gruesos= 1- (% volumen de fragmentos gruesos/100)

Finalmente se debe multiplicar por 10 para convertir las unidades a toneladas de carbono por hectárea (tC/ha).

El procedimiento seguido para obtener los datos de cada una de las variables que componen la fórmula se describe a continuación.

Porcentaje de carbono en el suelo

En las sub-parcelas 17,19, 27 y 29 de cada uno de los 20 sitios, se seleccionaron cuatro sitios al azar hacia el centro de cada sub-parcela. En cada uno de estos sitios se tomó una muestra de suelo hasta 30 cm de profundidad. Luego, las cuatro muestras de cada parcela fueron bien mezcladas para obtener una muestra homogénea de cada parcela relativa a 500 g. Seguidamente la muestra obtenida fue depositada en una bolsa y llevada al Laboratorio de Suelos y Foliar del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica (UCR) para determinar el carbono total (%) presente en cada muestra.

Densidad aparente

La densidad aparente es igual al peso seco del suelo (en gramos) dividido por el volumen del suelo (en cm³). Para la determinación de esta variable en las unidades de muestreo, se utilizó el método del "cilindro de volumen conocido" descrito por MacDicken (1997) haciendo uso de un cilindro metálico de 5 cm de diámetro y 5 cm de profundidad, con un volumen de 100 ml. El cilindro fue totalmente introducido en el suelo de manera vertical,

a tres profundidades (0-10, 10-20, y 20-30 cm) para lo cual se utilizó un mazo de acero. Luego se extrajo el cilindro del suelo con una pala y seguidamente se eliminó el sobrante de suelo de los bordes del cilindro. Una vez lleno y nivelado por ambos extremos, se extrajo el suelo contenido cuyo volumen corresponde al del cilindro. Luego las muestras fueron depositadas en una bolsa obteniendo cuatro muestras por parcela y llevadas al Centro de Investigación e Integración Bosque Industria (CIIBI) del Instituto Tecnológico de Costa Rica para ser puestas en un horno a 105° C por un periodo de 24 horas. Posteriormente se pesó cada una de las muestras y se obtuvo el valor de peso seco, en gramos.

Fragmentos gruesos

Para hacer uso de la ecuación 5, se determinó el porcentaje de fragmentos gruesos. Para ello se calculó la pedregosidad en cada una de las parcelas, con base en siete categorías descritas en la Metodología para la determinación de la capacidad uso de las tierras de Costa Rica (Decreto N° 23214-MAG-MIRENEM 1991).

Resultados

a) Biomasa sobre el suelo

Biomasa de Mantillo: En total se recolectaron 80 muestras para determinar la biomasa seca acumulada en la capa de mantillo en los diferentes estadios de sucesión de bosque, los resultados muestran una variación de 1,70 a 20,10 t/ha. Al calcular los valores promedio para cada una de las parcelas permanentes de monitoreo (PPM), se encontró que el valor máximo alcanzado corresponde a la parcela 10 (bosque primario) con 10,84 t/ha y el valor mínimo de biomasa de mantillo fue encontrado en la parcela 20 (5-15 años) con 3,56 t/ha.

En el cuadro 1 se presentan los valores obtenidos de biomasa promedio (t/ha) para la capa de mantillo acumulada en los diferentes estadios de sucesión. Este cuadro muestra que la biomasa de mantillo aumenta conforme se incrementa la edad o estadio sucesional, sin embargo solo se encontraron diferencias significativas ($\alpha = 0,05$) entre bosque primario y bosques de 5-15 años.

Cuadro 1. Biomasa promedio (t/ha), desviación estándar (S), coeficiente de variación (CV) y comparación estadística (DMS) para el mantillo acumulado en cuatro estadios de sucesión, en bosques de la Península de Osa, Puntarenas, Costa Rica 2011.

Estadio sucesión	B (t/ha)	S	CV (%)	
5-15 años	5,60	2,06	36,80	c
15-30 años	5,97	1,81	30,37	bc
> 30 años	7,93	1,38	17,43	ab
Primario	9,75	1,05	10,79	ab
Promedio	7,31	2,26	30,96	-

*Valores con la misma letra son estadísticamente iguales para cada alfa de 0,05

El cuadro 1 muestra la formación de dos grupos estadísticos para comparar, por un lado se puede agrupar los bosques de sucesión temprana (5-15 y 15-30 años) y por otro lado los bosques maduros (> 30 años y primario). Al efectuar una prueba de DMS para comparar las medias de estos dos grupos se encontró que existe diferencia significativa en la biomasa de mantillo acumulada en los bosques de sucesión temprana respecto a la de bosques más viejos.

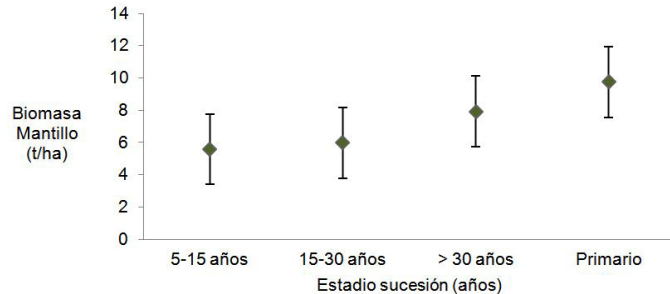


Figura 1. Biomasa promedio (t/ha) de mantillo para cuatro estadios de sucesión en bosques de la Península de Osa, Puntarenas, Costa Rica 2011. Las líneas verticales representan el valor calculado DMS.

Los resultados de esta investigación muestran que la acumulación de biomasa en la capa de mantillo tiende a aumentar conforme la edad del bosque (Figura 1), donde los bosques primarios acumulan más biomasa y son estadísticamente distintos ($\alpha = 0,05$) a bosques de sucesión temprana (5 - 15 años).

Biomasa de madera muerta (caída)

En total se recolectaron 99 muestras de madera muerta para determinar la densidad, y se midieron 385 trozas para efectuar el cálculo de la biomasa acumulada en la madera muerta sobre el suelo en los diferentes estadios de sucesión de bosque. Los resultados por sub-parcela mostraron una variación de 0 a 89,60 t/ha para todos los datos.

Al efectuar los cálculos para obtener el valor promedio por parcela, se encontró que un bosque de 15-30 años (Parcela 1) acumula la menor cantidad de biomasa de madera muerta siendo esta de 0,15 t/ha, mientras que un bosque primario (Parcela 3) obtuvo el máximo de 22,64 t/ha.

En el cuadro 2 se muestran los valores obtenidos de biomasa promedio de madera muerta (t/ha) para los cuatro estadios de sucesión de bosque. Los bosques primarios y bosques de 15-30 años acumulan la mayor cantidad de biomasa promedio (t/ha) para el componente de madera muerta siendo de 5,83 t/ha y 7,81 t/ha respectivamente. Mientras que los valores en bosques de 5 - 15 años y mayores de 30 son muy similares donde los primeros acumulan 3,42 t/ha y los segundos 3,23 t/ha ($\alpha = 0,05$).

Cuadro 2. Biomasa promedio (t/ha), desviación estándar (S), coeficiente de variación y prueba de DMS para el componente madera muerta en cuatro estadios de sucesión, en bosques de la Península de Osa, Puntarenas, Costa Rica 2011.

Estadio de la sucesión	B (t/ha)	S	CV (%)	
5-15 años	3,42	2,26	66,24	a
15-30 años	5,84	6,29	107,71	a
> 30 años	3,26	2,87	88,27	a
Primario	7,80	9,59	122,86	a
Promedio	5,08	5,85	115,17	-

*Valores con la misma letra son estadísticamente iguales para un alfa de 0,05

A partir de la figura 2 se puede ver que los valores de biomasa en madera muerta más altos se encuentran en bosques de 15 a 30 años y en bosques maduros, mientras que los bosques de 5-15 años y mayores de 30 años acumulan casi la misma cantidad de biomasa. Sin embargo, al efectuar el análisis para comparar si existen diferencias significativas ($\alpha = 0,05$) entre los estadios de sucesión, es decir, si la biomasa que cae en bosques de sucesión temprana varía con respecto a bosques maduros, no se encontraron diferencias que representen una variación en los valores de biomasa de madera muerta con respecto a la edad del bosque.

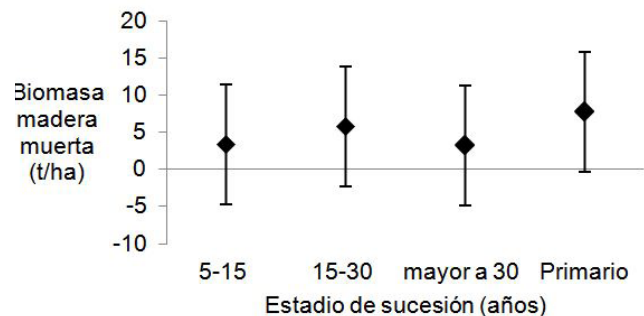


Figura 2. Biomasa promedio (t/ha) de madera muerta para cuatro estadios de sucesión en bosques de la Península de Osa, Puntarenas, Costa Rica 2011. Las líneas verticales indican el valor calculado DMS.

b) Carbono en el suelo

En total, se recolectaron 80 muestras de suelo para determinar la densidad aparente en los diferentes estadios de sucesión de bosque, los resultados muestran una variación de 0,71 a 1,38 g/cm³. Los valores promedio de densidad aparente son mayores en bosques de 15 - 30 años (1,13 g/cm³), seguido por bosques mayores a 30 años (1,02 g/cm³), bosques de 5 - 15 años (0,96 g/cm³) y por último los datos más bajos en bosques primarios (0,91 g/cm³) (Cuadro 3). La prueba estadística demostró que existen diferencias significativas en la densidad aparente en bosques de 15 - 30 años respecto a bosques primarios ($\alpha = 0,05$).

Cuadro 3. Densidad promedio (g/cm³), desviación estándar (S), coeficiente de variación (%CV) y porcentaje de carbono orgánico del suelo para cuatro estadios de sucesión de bosque en la Península de Osa, Puntarenas, Costa Rica, 2011.

Estadio de la sucesión	d (g/cm ³)	S	CV (%)	COS (%)	s	CV (%)
5-15 años	0,96 ab	0,12	12,09	3,04 a	0,92	30,25
15-30 años	1,13 a	0,11	10,16	2,74 a	0,45	16,48
> 30 años	1,02 ab	0,21	20,45	3,95 a	1,49	37,81
Primario	0,91 b	0,05	5,96	3,59 a	0,62	17,27
Promedio	1,01	0,15	14,91	3,33	1,00	30,06

* Valores con la misma letra son estadísticamente iguales para un alfa de 0,05

Los porcentajes de carbono orgánico (COS%) se reportan como altos si son mayores a 2,5%, medios si se encuentran entre 1 a 2,5% y bajos si son menores a 1% (Núñez 2000b). Para esta investigación los datos de COS (%) se consideran altos para la mayoría de las parcelas, exceptuando las parcelas 1, 9, 6, 12 y 18 que presentaron valores medios de COS (%). Estos valores van desde 1,7% hasta 6,24%, y son similares a los encontrados por Neumann *et al.* (2011) en bosques secundarios jóvenes en Panamá. En cuanto al promedio de COS (%) por estadio de sucesión los bosques mayores de 30 años tienen el mayor porcentaje de carbono en el suelo, mientras que los bosques de 15 - 30 años fueron los de menor porcentaje (Cuadro 4).

Los valores de COS (para una profundidad de 30 cm) por unidad de área oscilan entre 29,57 t/ha para bosque de 5-15 años (PPM 12) y 133,87 t/ha para bosque mayor a 30 años (PPM 4); valores que se encuentran dentro del rango reportado por Segura *et al.* (2005) para suelos de México donde el contenido de COS varía desde 0,2 hasta 493 t/ha.

Cuadro 4. Carbono orgánico del suelo (COS) (tC/ha), desviación estándar (S), coeficiente de variación (%CV) y resultado de la prueba DMS para cuatro estadios de sucesión, en bosques de la Península de Osa, Puntarenas, Costa Rica 2011.

Estadio de la sucesión	COS (tC/ha)	S	CV (%)	
5-15 años	79,85	29,84	37,37	b
15-30 años	88,01	15,43	17,53	ab
> 30 años	109,24	23,71	21,70	a
Primario	92,29	14,37	15,57	ab
Promedio	92,35	22,81	24,70	-

*Valores con la misma letra son estadísticamente iguales para un alfa de 0,05

Los bosques con edades superiores a 30 años presentaron el promedio más alto contenido de carbono orgánico en el suelo, mayores valores de contenido de carbono orgánico en el suelo (109,24 t/ha), con valores promedio intermedios en los bosques primarios (92,29 t/ha) y en los bosques de 15 a 30 años (88,01 t/ha); mientras que el promedio más bajo (78,49 t/ha) se registró en los bosques de 15 - 30 años (Figura 3).

De acuerdo con la prueba DMS, se observaron diferencias significativas únicamente entre el promedio más alto y el más bajo ($\alpha = 0,05$).

Los análisis ejecutados evidenciaron la formación de dos grupos: los bosques de sucesión temprana (5 -15 y 15 - 30 años) y los bosques maduros (> 30 años y primario).

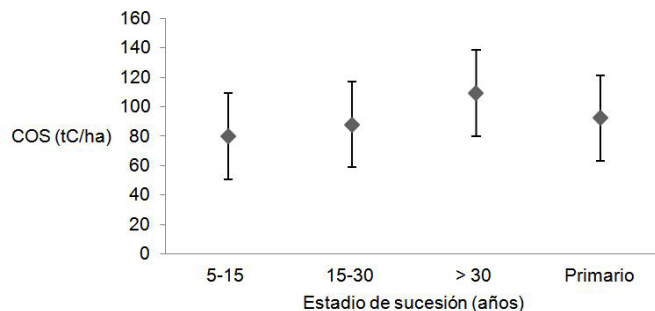


Figura 3. Carbono promedio (tC/ha) en el suelo cuatro estadios de sucesión en bosques de la Península de Osa, Puntarenas, Costa Rica 2011. Las líneas verticales representan el valor calculado DMS.

En la figura 4 muestra los valores de biomasa muerta (en t/ha) por clases diamétricas. En todos los estadios de sucesión se encontraron árboles muertos pertenecientes a las clases inferiores a 45 cm, mientras que únicamente en el bosque primario se registraron árboles muertos con diámetros mayores a 45 cm.

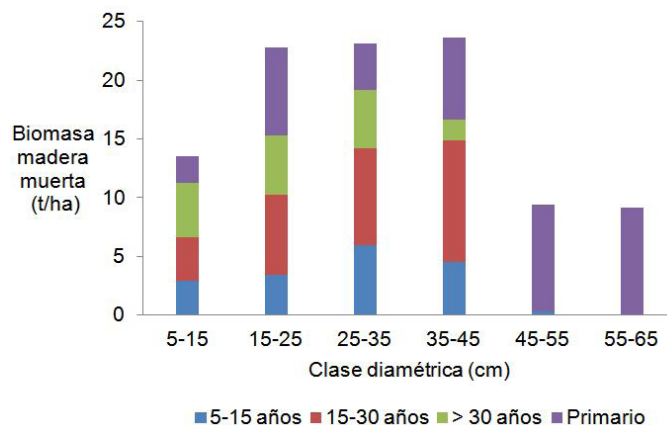


Figura 4. Biomasa promedio de madera muerta (t/ha) por clase diamétrica en unidades de 0,01 ha para bosques de diferentes estadios sucesionales en la Península de Osa, Puntarenas, Costa Rica 2011.

Discusión

a) Biomasa sobre el suelo

Biomasa de mantillo

Este estudio demuestra que la biomasa sobre el suelo tiende a aumentar conforme se incrementa el estadio sucesional del bosque. Algunos autores como Grimm y Fassbender (1981); citados por Fassbender (1984) han realizado estudios donde reportan un total de 39,60 t/ha

para la biomasa de mantillo, la cual dividen en mantillo reciente (hojarasca) con 5,90 t/ha y mantillo descompuesto con 33,70 t/ha, correspondiente a un ecosistema montano andino (Reserva de San Eusebio en Mérida, Venezuela).

Por otro lado, Chacón *et al.* (2007) reportan para bosques secundarios de la Región Atlántica de Costa Rica una capa de mantillo de 0,10 ($\pm 0,02$) t/ha, valores que se encuentran muy por debajo de los encontrados en este trabajo. Arnaldos *et al.* (2003) mencionan que para latitudes medias la mayor parte de los bosques producen de 3 a 6 t/ha de mantillo cada año, datos similares a los de nuestro estudio.

De acuerdo con Arnaldos *et al.* (2004), las existencias de mantillo dependen de las tasas de producción de cada tipo de comunidad vegetal; de las tasas de mineralización o descomposición, del tiempo que esta capa de mantillo tarda en descomponerse y su velocidad varía con el clima y el sustrato. La actividad de los descomponedores se incrementa con la temperatura y la humedad y se reduce con la sequía (Arnaldos *et al.* 2004). Estos autores sostienen que en ocasiones, la tasa de producción de mantillo es superior a la de descomposición y se producen acumulaciones de materia seca sobre el suelo.

De acuerdo con Fournier (1989), la sucesión forestal además de recuperar el bosque, permite mantener un nivel de nutrientes en el sistema, reflejado en componentes como la biomasa del mantillo la cual en bosques de 30 años es más diversa y estable que la de otros estadios de sucesión anteriores. Este comportamiento descrito por Fournier (1989) es semejante a lo encontrado en este estudio donde la biomasa promedio de mantillo fue proporcional al aumento de la edad de la sucesión vegetal.

Biomasa de madera muerta

La cantidad de madera muerta en un sitio está regulada por una serie de factores relacionados con el sitio, las especies circundantes, los disturbios, los agentes y organismos degradantes tales como la humedad y las termitas. La ocurrencia, frecuencia y probabilidad de apertura de claros es sin duda uno de los aspectos más importantes que regulan la dinámica de crecimiento de las especies, ligado a la muerte y sustitución de especies (Leigh *et al.* 1990). De acuerdo con estos autores, la caída de árboles es mayor en los meses de agosto y setiembre con un pico subordinado en marzo. Los meses más secos tienen vientos consistentemente fuertes que pueden provocar caída de ramas en incluso árboles; sin embargo, los meses más lluviosos presentan tormentas que traen consigo vientos más variables con más ráfagas.

En la investigación, la biomasa de madera muerta tuvo un comportamiento similar a la de mantillo, con tendencias al aumento según el avance del estadio sucesional del bosque. Delaney *et al.* (1998) encontraron que para seis tipos de bosque natural en Venezuela los valores de biomasa de madera muerta (incluyendo madera caída y en pie) se ubican en un rango de 1-77 t/ha.

De acuerdo con Harmon *et al.* 1986, citados por Delaney *et al.* (1998) la madera muerta puede llegar a significar gran parte de la biomasa total en algunos bosques, con un valor máximo reportado de 490 t/ha en los bosques de coníferas del Pacífico Noroeste.

Delaney *et al.* (1998) reportan en su estudio, un valor de biomasa de madera caída de 18,50 t/ha para bosque húmedo tropical y de 21,00 t/ha en bosque húmedo montano bajo. Por otra parte, Herrera *et al.* (2001) reportan para bosques primarios en Colombia valores promedio de detritos de madera gruesa (DMG) de 6,07 t/ha mientras que para bosques secundarios los valores dados son en promedio 2,02 t/ha. Además, estos autores, explican que estos valores son bajos porque los bosques primarios de la zona pueden no estar aún en un clímax o equilibrio y los árboles muy viejos y de grandes dimensiones todavía no mueren y caen. En el caso de los bosques de la Península de Osa, los valores promedio de biomasa seca para el componente madera muerta por edad, son similares a lo reportado por Herrera *et al.* (2001).

De acuerdo con Leigh *et al.* (1990) la dinámica del bosque juega un papel importante en la madera caída en bosques tropicales, las tasas de acumulación de biomasa muerta sobre el suelo van a depender del sitio, las especies, las tasas de cambio y la apertura de claros. Especies pioneras de vida corta que tienen una permanencia limitada a condiciones propias de luz, se consideran efímeras en el tiempo y su acumulación en madera muerta en el espacio será pronta. En su estudio en una franja de 10 m de anchura, a lo largo de ambos lados de 14 km de senderos en la isla de Barro Colorado en Panamá, 36 de los claros formados aparecieron por rotura de los árboles, mientras que sólo 16 se formaron por desarraigo, es decir que la mayor cantidad de madera caída existente en el ecosistema es proveniente de ramas que de árboles completos.

Según nuestra investigación en Península de Osa, Costa Rica, la biomasa de madera muerta es producto de árboles y ramas de diámetros menores, y ocurre en todos los estados de sucesión estudiados. Individuos de las mayores dimensiones aportaron sólo en estados de sucesión de bosques viejos o maduros. Árboles grandes generalmente no hacen aporte a la biomasa de madera muerta todos los estadios.

Este trabajo muestra que los tratamientos de 5-15 y 15-30 años no tienen individuos mayores a 45 cm de diámetro en el componente de madera muerta. La cantidad de madera muerta que se acumula en la edad 15-30 años en las categorías inferiores de diámetro es superior a la de bosques de 5-15 años, donde muchos de sus individuos están aún creciendo e incluso a los mayores de 30. Probablemente, en los bosques estudiados y en la categoría entre 15-30 años de edad, hay un importante aumento de individuos muertos de diámetros menores.

b) Carbono orgánico en el suelo

Uno de los factores que determinan el contenido de carbono orgánico almacenado en el suelo es la densidad aparente; de acuerdo con Núñez (2000b), la densidad aparente varía desde 0,1 g/cm³ o menos en suelos orgánicos, hasta 1,6 g/cm³ en suelos minerales y puede llegar hasta valores de 1,8 g/cm³ en suelos arenosos y 2,0 g/cm³ en suelos compactados. Como la densidad aparente incluye el espacio poroso, a mayores valores de densidad aparente disminuye proporcionalmente la porosidad del suelo; a su vez, si la densidad aparente disminuye aumenta la porosidad (Núñez 2000b).

El carbono orgánico del suelo (COS) promedio de los cuatro estadios de sucesión estudiados mostró una relación positiva de aumento conforme la edad del bosque hasta los 30 años. Luego de esta edad se observó una baja. Esta disminución puede ser debida a procesos que causan pérdidas de carbono del suelo, tal como la mineralización de la materia orgánica y la lixiviación del carbono orgánico e inorgánico lo que limita la acumulación de carbono a través del tiempo de acuerdo como lo menciona Núñez (2000a).

A su vez la densidad aparente del suelo juega un papel importante en el contenido de carbono. Para bosques primarios se encontró una densidad más baja que la hallada para bosques mayores a 30 años, lo que determina una mayor cantidad de poros disponibles en el suelo. Al existir más espacios porosos hay mayor disponibilidad de oxígeno y espacio para los microorganismos que se encargan de la mineralización de la materia orgánica (FAO 2002).

Según Jackson (2000), citado por IPCC (2006) lo habitual es que el contenido de C orgánico de los suelos forestales minerales (hasta 1 m de profundidad) varíe entre 20 y más de 300 toneladas de C/ha según el tipo de bosques y las condiciones climáticas. Una gran proporción de las entradas procede de la hojarasca aérea en los suelos forestales, por lo que la materia orgánica del suelo tiende a concentrarse en los horizontes superiores del suelo, con aproximadamente la mitad del C orgánico del suelo en la capa superior de 30 cm. A menudo, el C contenido en el perfil superior es el más descomponible químicamente y el de más exposición directa a perturbaciones naturales y antropogénicas.

Del mismo modo Cifuentes *et al.* (S.f.) explican que en el Bosque seco Tropical (Bs-T) hay mayor acumulación de carbono en el suelo que en Bosque húmedo Tropical y le atribuyen la causa a la humedad disponible en el suelo del Bosque húmedo tropical (Bh-T). Esta condición de humedad en el Bh-T es suficiente para no detener completamente la descomposición de materia orgánica, aún durante la época seca, por lo que los procesos de lixiviación y descomposición de la materia orgánica son más constantes y permiten; por tanto, una acumulación mayor de C a través del tiempo. Cifuentes *et al.* (S.f.) también encontraron que en Bosque húmedo Tropical los bosques secundarios tienen mayor cantidad de carbono almacenado en el suelo que los bosques primarios.

Los valores promedio de COS (tC/ha) fueron similares al%COS entre los bosques mayores de 30 años y los primarios, mientras que en los bosques más jóvenes no sucedió lo mismo. En este caso, los de 5-15 años tienen mayor porcentaje de C pero menor COS (t/ha) mientras que los de 15-30 años tienen menor%COS pero acumulan más COS (tC/ha). Este comportamiento podría estar estrechamente ligado a la densidad aparente del suelo ya que para los bosques de 5-15 años es menor lo que implica más espacio poroso por donde el carbono puede lixivarse.

Otro factor determinante en la baja acumulación de carbono en una parcela de 5 - 15 años, en la cual se obtuvo el valor más bajo (29,57 tC/ha) fue la alta pedregosidad en ese sitio. En esta parcela se encontraba un flujo de agua no permanente con un porcentaje de pedregosidad de 35%, lo que permite explicar mejor el movimiento del carbono por lixiviación y la dificultad para ser fijado y acumulado en el suelo.

En Sarapiquí, Powers y Veldkamp (2005) encontraron que los valores medios de C almacenado en el suelo mineral fueron similares en los bosques primarios (80,5 t/ha) y pastos (76,7 t/ha) a través de una gran región (1400 km). Similar a lo reportado por Schedlbauer y Kavanagh (2008) quienes encontraron un contenido de COS de 75,0 t/ha en pastos mientras que en charral y bosque secundario los valores fueron de 72,5 t/ha.

De la misma forma Cifuentes *et al.* (s.f.), hallaron similitud en el carbono almacenado en los primeros 30 cm del suelo entre bosques primarios y suelos de pastizales. Donde los valores encontrados para bosques primarios varían entre 57,80 y 127,44 t/ha, siendo menor el depósito de C en Bosque húmedo Tropical y mayor en Bosque pluvial Premontano.

Esta investigación concuerda con lo dicho por los diferentes autores, donde el COS en bosques primarios no es distinto al acumulado en bosques de sucesión temprana (5 -15 años).

Referencias

- Atlas Digital de Costa Rica. 2009. Edgar Ortiz Malavassi y Casia Soto Montoya. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Arnaldos, J; Navalón, X; Pastor, E; Planas, E; Zárata, L. 2004. Manual de ingeniería básica para la prevención y extinción de incendios forestales. Madrid, ES, Ediciones Mundi-Prensa. 414p.
- Buxó, R; Piqué, R. 2008. Arqueobotánica. Los usos de las plantas en la península Ibérica. Barcelona, ES, Ariel. 300 p.
- Chacón, P; Leblanc, HA; Russo, RO. 2007. Fijación de carbono en un bosque secundario de la región tropical húmeda de Costa Rica. (en línea). Guácimo, CR, Escuela de Agronomía de la Región Trópico Húmeda (EARTH). Tierra Tropical 3(1):1-11. Consultado 1 abr. 2011. Disponible en http://usi.earth.ac.cr/tierratropical/archivos-de-usuario/Edicion/37_v3.1-01_Chacón.pdf

- Cifuentes, M; Jobse, J; Watson, V; Kauffman, B. S.f. Determinación de carbón total en suelos de diferentes tipos de uso de tierra a lo largo de una gradiente climática en Costa Rica. (en línea). Consultado 28 oct. 2010. Disponible en <http://www.una.ac.cr/inis/docs/suelos/VicWat.pdf>
- Delaney, M; Brown, S; Lugo, AE; Torres-Lezama, A; Bello Quintero, N. 1998. The quantity and turnover of dead wood in permanent forest plots in six life zones of Venezuela. *Biotropica* 30(1):2-11.
- Delgado, L; Pedraza, RA. 2002. La madera muerta de los ecosistemas forestales. *Foresta Veracruzana* 4(2):59-66.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT). 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informes sobre recursos mundiales de suelos. (en línea). Roma, IT, FAO. 83 p. Consultado 19 abr. 2011. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/005/Y2779S/Y2779s00.HTM>
- Fassbender, HW. 1984. Bases edafológicas de los sistemas de producción agroforestales. Turrialba, CR, CATIE. 192 p.
- Fournier, LA 1989. Importancia de la reforestación en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 13:127-133.
- Herrera, MA; del Valle, JI; Orrego, SA. 2001. Biomasa de la vegetación herbácea y leñosa pequeña y necromasa en bosques tropicales primarios y secundarios de Colombia. (en línea). In *Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*. (2001, Valdivia, CL). Simposio Internacional. Valdivia, CL, El Simposio. Consultado 20 oct. 2010. Disponible en http://www.uach.cl/procarbono/pdf/simposio_carbono/28_Herrera.PDF
- Houghton, RA. 2008. El flujo de carbono a la atmósfera a partir de los cambios de uso del suelo: 1850-2005. En las tendencias: Un compendio de datos sobre el cambio global, Dióxido de Carbono del Centro de Análisis de Información. Tennessee, US, Laboratorio Nacional Oak Ridge, Departamento de Energía. Consultado 3 mar. 2011. Disponible en <http://cdiac.ornl.gov/trends/landuse/houghton/houghton.html>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, UK / US). 2001. Climate change 2001: Glosario de términos. Anexo B. Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the IPCC. Eds. Metz, B, O.R. Davidson, R. Swart, y J. Pan. Cambridge, UK / US, Cambridge University Press. 752 p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, UK / US). 2006. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. (en línea). Consultado 7 oct. 2010. Disponible en <http://www.ipcc.ch>
- Kanninen, M. 2003. Secuestro de carbono en bosques, su papel en el ciclo global. CATIE. Turrialba. CR. In *Agroforestería para la producción animal en América Latina II. Memorias de la Segunda Conferencia Electrónica*. Eds M.D. Sánchez y M. Rosales Méndez. FAO, Roma. IT. Consultado 3 set. 2010. Disponible en <http://www.fao.org/DOCREP/006/Y4435S/y4435s09.htm>
- Leigh, E; Stanley, A; Windsor, D. 1990. Ecología de un bosque tropical. Ciclos estacionales y cambios a largo plazo. Trad. Olga Londoño de Hobrecker. Balboa, PA, Smithsonian Tropical Research Institute. 546p.
- Louman, B. 2006. Impacto ambiental del aprovechamiento. In Orozco, L; Brúmer, C; Quirós, D. *Aprovechamiento de impacto reducido en bosques latifoliados húmedos tropicales*. Turrialba, CR, CATIE. 361-397 p.
- Lugo, AE; Brown, S. 1992. Tropical forest as sinks of atmospheric carbon. *Forest Ecology and Management* 54:239-255.
- Morales, M. 2010. Composición florística, estructura, muestreo diagnóstico y estado de conservación de una cronosecuencia de bosques tropicales del Corredor Biológico Osa, Costa Rica. Tesis Lic. Cartago, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. 115 p.
- Neumann, L; Zimmermann, B; Hall, JS; van Breugel, M; Helmut, E. 2011. Soil carbon dynamics under young tropical secondary forests on former pastures: A case of study from Panama. *Forest Ecology and Management* 261:1625-1633.
- Núñez, J. 2000a. Fertilidad de suelos. Ciclo de macronutrientes. Curso de Fertiliego. Cartago, CR, Instituto Tecnológico de Costa Rica e Instituto Nacional de Aprendizaje. s.p.
- Núñez, J. 2000b. Fundamentos de edafología. 2ª ed. San José, CR, EUNED. 185 p.
- Pozo, J; Elosegí, A; Díez, J; Molinero, J. 2009. Dinámica y relevancia de la materia orgánica. In Elosegí, A; Sabater, S. *Conceptos y técnicas en ecología fluvial*. Bilbao, ES, Fundación BBVA. 444 p.
- Powers, JS; Veldkamp, E. 2005. Regional variation in soil carbon in forests and pastures of northeastern Costa Rica. (en línea). *Biogeochemistry* 72:315-336. Consultado 10 abr. 2011. Disponible en <http://www3.cbs.umn.edu/labs/powers/powers2005b.pdf>
- Prodan, M; Peters, FC; Real, P. 1997. *Mensura forestal*. San José, CR, GTZ e IICA. 586 p
- Segura, M; Kanninen, M. 2002. Inventarios para estimar carbono en ecosistemas forestales tropicales. In Orozco, L; Brumér, C., Eds. *Inventarios forestales para bosques latifoliados en América Central*. Turrialba, CR, CATIE. p. 202-213.
- Segura, MA; Sánchez, P; Ortiz, CA; Gutiérrez, MC. 2005. Carbono orgánico de los suelos de México. (en línea). *Terra Latinoamericana* 23(1):21-28. Chapingo, MX. Universidad Autónoma Chapingo. Consultado 15 abr. 2011. Disponible en <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=57323103>
- Schedlbauer, JL; Kavanagh, KL. 2008. Soil carbon dynamics in a chronosequence of secondary forests in northeastern Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 255:1326-1335.
- Vaccaro, S; Arturi, M; Goya, J; Frangi, J; Piccolo, G. 2003. Almacenaje de carbono en estadios de la sucesión secundaria en la provincia de Misiones, Argentina. *Interciencia* 28(9):521-527.

- Vilchez A, B; Rocha, O. 2005. Estructura de una población del árbol *Peltogyne purpurea* (Cesalpinoaceae) en un bosque intervenido de la Península de Osa, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical* 54(3):1019-1029.
- Vilchez A, B; Chazdon, R; Milla, V. 2009. Dinámica de la regeneración en cuatro bosques secundarios tropicales de la región Huetar Norte, Costa Rica. Su valor para la conservación o uso comercial. *Recursos Naturales y Ambiente* 55:118-128.