



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO DE LICENCIATURA EN
INGENIERÍA FORESTAL

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 ARIAS

CARTAGO, COSTA RICA

2011

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

Resumen

Como 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”, se establecieron 20 parcelas permanentes de monitoreo (PPM), de 5000 m² (50x100m), en la Península de Osa, Puntarenas, Costa Rica. Estas parcelas fueron establecidas durante el 2009, 2010 y 2011, y distribuidas en los sectores Río Piro, Matapalo, Los Mogos y Bahía Chal. Para este estudio se cuantificó la cantidad de biomasa seca acumulada en la capa de mantillo sobre el suelo, la biomasa en la madera muerta y la cantidad 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, 15-20 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, 5,84 t/ha en bosques de 15-30 años, 3,26 t/ha en bosques mayores de 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). Se encontraron diferencias estadísticas ($\alpha=0,05$) en la biomasa de mantillo acumulada en bosques primarios respecto 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 ($\alpha=0,05$).

¹ Aguilar, H. 2010. Biomasa sobre el suelo y carbono orgánico en el suelo en cuatro estadios de sucesión de bosques en la Península de Osa, Costa Rica. Tesis de Licenciatura. Cartago, CR, Instituto Tecnológico de Costa Rica. 54p.

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. Este trabajo muestra la dinámica de acumulación de biomasa sobre el suelo y carbono orgánico en el suelo como una variación con respecto a la edad de los bosques, donde en general se observaron tendencias de aumento conforme avanza el estadio sucesional, lo que podría convertirse en un escenario de recuperación de áreas degradadas y su la utilización como sumideros de carbono, como una opción viable para los dueños de los bosques.

Palabras clave: Sucesión de bosque, Cambio climático, Fijación de CO₂, Biomasa, Mantillo, Madera muerta, Carbono orgánico en el suelo (COS), Densidad aparente.

ABOVE-GROUND BIOMASS AND ORGANIC CARBON SOIL IN FOUR STAGES OF SUCCESSION OF TROPICAL FORESTS IN PENÍNSULA DE OSA, COSTA RICA

Abstract

As part of the project "Baseline studies of biodiversity, environmental services and values to the conservation of secondary and mature forests in the Osa Biological Corridor" was established 20 permanent monitoring plots (PPM Spanish abbreviation) of 5000 m² (50x100m) at Osa Peninsula, Puntarenas, Costa Rica. These plots were established in 2009, 2010 and 2011, and distributed in in four sectors areas Rio Piro, Matapalo, Los Mogos and Bahia Chal. 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, 15-20 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, 5.84 t ha⁻¹ in 15-30-year forests; 3.26 t ha⁻¹ in forests older than 30 years 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. This work shows the dynamics of accumulation of above-ground biomass and organic carbon in soil as a variation with respect to forest age, where general trends were observed increased with successional stage, which could become a stage of recovery of degraded areas and their use as carbon sinks, as a viable option for owners of forests

Keywords: forest succession, climate change, CO₂ fixation, biomass, mulch, dead wood, soil organic carbon (SOC), bulk density.

Acreditación

Esta tesis fue aceptada por el Tribunal Evaluador de la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica y aprobada por el mismo como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura.

BIOMASA SOBRE EL SUELO Y CARBONO ORGÁNICO EN EL SUELO
EN CUATRO ESTADIOS DE SUCESIÓN DE BOSQUES TROPICALES
EN LA PENÍNSULA DE OSA, COSTA RICA

Miembros del Tribunal Evaluador

Edgar Ortiz Malavassi, Ph.D.
Director de Tesis

Braulio Vílchez Alvarado, M. Sc.
Escuela de Ingeniería Forestal

Marvin Castillo Ugalde, Lic
Escuela de Ingeniería Forestal

Heileen Aguilar Arias
Estudiante

Dedicatoria

A mi padre Fernando y mi madre Lilliana por concebirme en vida y forjar
la persona que hoy soy,
y a mis hermanos por lo que son.

A los bosques de Osa, por ser mi inspiración durante toda la carrera.

A todas las personas que viven y trabajan, por, y para los bosques, cuyo mérito
nunca es reconocido.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme fuerza en los momentos más difíciles.

A mis padres y hermanos por todo el apoyo brindado, en especial a Fernando y Dahianna por apoyarme tanto financieramente.

A mi tutor, Edgar Ortiz, por la oportunidad y por sus consejos.

A Braulio Vílchez, por su colaboración en la lectura, así como por los consejos brindados.

A Marvin Castillo, por su colaboración en la lectura y por la ayuda mostrada.

A Marco Ortega por colaborar con la coordinación del trabajo de campo.

A Israel y Marvin López por colaborar con gran empeño en el trabajo de campo.

A Marcela Navarro, Shari Mullins y Tatiana Loayza por ser grandes amigas y un apoyo durante toda la carrera.

A Jorge Arturo Núñez por la paciencia y colaboración brindadas durante el transcurso del proyecto.

A las personas que son parte de mi vida por estar en todos los momentos.

Índice general

Resumen.....	i
Abstract	iii
Acreditación	iv
Dedicatoria	v
Agradecimientos	vi
Índice general	vii
Índice de cuadros.....	ix
Índice de figuras.....	x
Índice de anexos.....	xi
I. Introducción	1
1.1. Objetivos	3
1.1.1. Objetivo general.....	3
1.1.2. Objetivos específicos	3
1.2. Hipótesis	4
II. Marco de referencia.....	5
2.1. La problemática ambiental en torno a los Gases de Efecto Invernadero (GEI)	5
2.2. El Carbono en las plantas y su función como captadoras de CO ₂	6
2.3. Biomasa	7
2.3.1. Biomasa de mantillo	8
2.3.2. Biomasa de madera muerta.....	9
2.4. Carbono en suelo.....	11
2.4.1. Carbono en el suelo y materia orgánica.....	11
2.4.2. Carbono en suelo y densidad aparente del suelo.....	12
2.5. Estudios de biomasa y carbono en el suelo.....	13

III. Materiales y Métodos.....	15
3.1. Aspectos generales de los sitios	15
3.1.1. Ubicación de los sitios de muestreo	15
3.1.2. Caracterización biofísica de los sitios de muestreo	19
3.2. Diseño del muestreo.....	21
3.3. Toma de muestras.....	22
3.3.1. Metodología para biomasa sobre el suelo	22
3.3.2. Metodología para carbono en suelo.....	25
3.4. Análisis de datos.....	27
IV. Resultados y discusión	28
4.1. Biomasa sobre el suelo.....	28
4.1.1. Biomasa de Mantillo	28
4.1.2. Biomasa de madera muerta (caída).....	32
4.2. Carbono en el suelo	36
V. Conclusiones	41
VI. Recomendaciones.....	42
VII. Bibliografía.....	43
VIII. Anexos.....	50

Índice de cuadros

Cuadro 1. Ubicación de las veinte parcelas permanentes de muestreo en diferentes sectores de la Península de Osa, Puntarenas, Costa Rica 2010.....	18
Cuadro 2. Descripción de los estadios sucesionales establecidos en el diseño de muestreo en bosques de la Península de Osa, Puntarenas, Costa Rica, 2010. Fuente: Adaptado de Morales 2010.	21
Cuadro 3. 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.	28
Cuadro 4. 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.....	31
Cuadro 5. Densidad promedio (g/cm ³), 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.....	35
Cuadro 6. 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.	37

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación de Parcelas Permanentes de Monitoreo en el Sector de Río Piro y Matapalo, Península Osa, Costa Rica.	16
Figura 2. Ubicación de las Parcelas Permanentes de Monitoreo en el Sector de Los Mogos y Bahía Chal, Península Osa, Costa Rica.	17
Figura 3. 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 la DMS.	31
Figura 4. 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 la DMS.	34
Figura 5. Biomasa promedio de madera muerta (t/ha) por clase diamétrica en unidades de 0,01ha para bosques de diferentes estadios sucesionales en la Península de Osa, Puntarenas, Costa Rica 2011.....	35
Figura 6. Carbono promedio (tc/ha) en el suelo cuatro estadios de sucesión en bosques de la Península de Osa, Puntarenas, Costa Rica 2011.	39

Índice de anexos

Anexo 1. Análisis de varianza (ANDEVA) para la biomasa de mantillo (t/ha) en función del estadio de sucesión de bosque y prueba de Diferencia Mínima Significativa (DMS) para un alfa de 0,05; salida de resultados del programa Statistix 9.0.	50
Anexo 2. Análisis de varianza (ANDEVA) para la biomasa de madera muerta (t/ha) en función del estadio de sucesión de bosque y prueba de Diferencia Mínima Significativa (DMS) para un alfa de 0,05; salida de resultados del programa Statistix 9.0.	50
Anexo 3. Análisis de varianza (ANDEVA) para el contenido de carbono orgánico en el suelo (COS tC/ha) en función del estadio de sucesión de bosque y prueba de Diferencia Mínima Significativa (DMS) para un alfa de 0,05; salida de resultados del programa Statistix 9.0. ...	51
Anexo 4. Análisis de varianza (ANDEVA) para la densidad aparente del suelo (g/cm^3) en función del estadio de sucesión de bosque y prueba de Diferencia Mínima Significativa (DMS) para un alfa de 0,05; salida de resultados del programa Statistix 9.0.	51
Anexo 5. Análisis de varianza (ANDEVA) para el porcentaje de carbono orgánico en el suelo (COS %) en función del estadio de sucesión de bosque y prueba de Diferencia Mínima Significativa (DMS) para un alfa de 0,05; salida de resultados del programa Statistix 9.0. ...	52
Anexo 8. Croquis con la ubicación de las unidades montadas en cada PPM, en cuatro estadios de sucesión de bosques tropicales en la Península de Osa, Puntarenas, Costa Rica, 2011.	53

I. Introducción

De acuerdo con Kanninen (2000), la investigación en cambio climático y uso de la tierra en los trópicos, se ha 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 y de carbono. Sin embargo, se han hecho algunos estudios para tratar de cuantificar el potencial del uso sostenible de la tierra para secuestrar y acumular dióxido de carbono en los ecosistemas tropicales. Consecuentemente, esta posibilidad ha pasado a ser un elemento explícito de las políticas de cambio climático de los diferentes países (Cifuentes *et al* s.f.).

En el cambio climático global, la biomasa forestal juega un papel importante debido a que cumple la función de sumidero de los gases de efecto invernadero; principalmente en la fijación y almacenamiento de carbono a través del proceso de fotosíntesis (Segura & Kanninen 2002). En este sentido, es de gran importancia calcular la cantidad de biomasa que se acumula en los distintos componentes del bosque, como lo son, la biomasa en pie (árboles en pie), la biomasa sobre el suelo (necromasa), y la biomasa en el suelo (raíces).

Estos componentes forman gran parte de diversos ecosistemas boscosos y se encuentran disponibles en diferentes cantidades. Dependen 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).

Por otro lado, los ecosistemas boscosos almacenan gran parte del carbono en el suelo. La disponibilidad de este elemento en el suelo mineral se ve altamente influenciada por la biomasa aérea y depende de factores como la densidad aparente, la textura y la profundidad. Y varía de acuerdo con los 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 & Brown 1992).

En este estudio se determina el aporte de biomasa seca (t/ha) que proporcionan los componentes de madera muerta sobre el suelo (no se incluyen árboles muertos en pie), y mantillo. Así mismo, se determina la cantidad de carbono total (t/ha) almacenado en el suelo, en cuatro estadios de sucesión en bosques tropicales de la Península de Osa.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Determinar la biomasa sobre el suelo y el contenido de carbono en el suelo en diferentes estadios sucesionales de bosques tropicales en la Península de Osa, Costa Rica.

1.1.2. Objetivos específicos

- Determinar la biomasa en madera muerta y mantillo en los diferentes estadios sucesionales de bosques tropicales de la Península de Osa.
- Cuantificar el contenido de carbono en suelo en los diferentes estadios sucesionales de bosques tropicales de la Península de Osa.
- Comparar la biomasa de madera muerta y mantillo en diferentes estadios sucesionales de bosques tropicales de la Península de Osa.
- Comparar contenido de carbono en suelo en diferentes estadios sucesionales de bosques tropicales de la Península de Osa.

1.2. Hipótesis

En este estudio se plantea que las condiciones en los suelos no varían conforme se incrementa la edad del bosque; con lo cual, se busca probar que la biomasa sobre el suelo (mantillo y madera muerta) no presenta variación real en ninguno de los estadios de sucesión de bosque.

Al mismo tiempo la cantidad de carbono almacenado en los suelos de los bosques tropicales, no presenta variación respecto al estadio de sucesión.

II. Marco de referencia

2.1. La problemática ambiental en torno a los Gases de Efecto Invernadero (GEI)

El efecto invernadero es un fenómeno natural que ha permitido el desarrollo de la vida en el planeta. El mismo es causado por la presencia de gases en la atmósfera, principalmente vapor de agua y gas carbónico, permitiendo la retención de parte de la energía calórica que recibe del sol, y el mantenimiento de una temperatura dentro de límites que han permitido el desarrollo de la vida como la conocemos. Sin la concentración natural de estos gases en la atmósfera, la temperatura promedio en la superficie de la tierra sería similar a la de la luna, unos 18° C bajo cero (Centeno, 1992). Los gases del efecto invernadero permiten el paso de las radiaciones solares de onda corta, calentando la superficie de la tierra. A la vez, absorben parte del calor que emana de la superficie de la tierra, en forma de radiaciones infrarrojas, de mayor longitud de onda, manteniendo una temperatura en la superficie del planeta de aproximadamente 15° C (Centeno, 1992).

En las últimas décadas, los ciclos naturales de oscilación en la temperatura y la precipitación, se han visto caracterizados por fuertes variaciones que conducen a extremos climáticos y meteorológicos en diferentes partes del planeta. Algunas actividades del ser humano producen contaminación con gases de efecto invernadero, lo que genera marcadas oscilaciones en la variabilidad climática. Muchos científicos coinciden en que los efectos de la variabilidad climática interanual se están mezclando y potenciando con los efectos del cambio climático (Zwiers *et al* 2003, Sinha Ray y De 2003, IPCC 2007, citados por IMN 2008).

Según el IPCC (2007), la concentración de Gases de Efecto Invernadero (GEI) ha incrementado a lo largo del siglo pasado. En torno a este tema se han generado diversos estudios en los que se concluye que si el incremento de los GEI continua los efectos cada vez serán más significantes para el cambio de clima; consecuentemente, se generara un desequilibrio en el sistema.

El CO₂ es uno de los compuestos más importantes de los GEI, generado en su mayoría, por la actividad humana, en donde procesos como la deforestación y los cambios de uso del suelo agravan sus concentraciones en la atmósfera lo que contribuye al cambio climático (UNEP 2001 citado por González 2008).

En el cambio climático global, la biomasa forestal juega un papel importante debido a que cumple la función de sumidero de los gases de efecto invernadero; principalmente, en la fijación y almacenamiento de carbono a través del proceso de fotosíntesis (Segura & Kanninen 2002).

2.2. El Carbono en las plantas y su función como captadoras de CO₂

De los dieciséis elementos químicos considerados esenciales para el crecimiento de las plantas, tres macronutrientes que incluyen carbono, hidrógeno y oxígeno (C, H y O respectivamente), son obtenidos del aire y del agua (Núñez 2000). La unidad básica de la estructura de clorofila es el sistema de anillos de porfirina, que consiste de cuatro anillos pirrólicos, cada uno con un átomo de nitrógeno y cuatro de carbono, además hay un átomo de magnesio en el medio de cada anillo de porfirina (Núñez 2000). De esta forma, se puede ver que las plantas requieren gran cantidad de carbono para desarrollar su proceso de fotosíntesis.

Los bosques, incluyendo las plantaciones forestales, cumplen un importante papel en el ciclo del carbono global, dado que gran parte de la biomasa está conformada por carbono (aproximadamente el 50%). La tasa de fijación de carbono está en función de la especie, el índice de sitio, el turno, etc. El índice anual de fijación de carbono es más alto en las plantaciones jóvenes, o sea, las que se encuentran en pleno crecimiento (Ciesla 1996).

El carbono almacenado en un depósito puede cambiar debido a la diferencia entre adiciones de carbono y pérdidas de carbono. Cuando las pérdidas son mayores que las adiciones, el carbono almacenado disminuye, y por lo tanto el depósito actúa como fuente de la atmósfera; cuando las pérdidas son menores que las adiciones, el depósito actúa como sumidero de la atmósfera (IPCC 2001).

Los bosques tropicales pueden actuar como fuentes o sumideros de carbono, por ello es necesario estudiar los flujos de éste y la cantidad almacenada en los diferentes tipos de bosques para conocer acerca de su capacidad de almacenamiento, liberación o neutralidad en el ciclo del C y su concentración en la atmósfera (Lugo & Brown 1992).

2.3. Biomasa

Según la IPCC (2001), la biomasa es toda materia orgánica aérea o subterránea, viva o muerta. La biomasa aérea viva puede ser calculada por medio de métodos destructivos o bien utilizando modelos alométricos ya establecidos. Mientras que la determinación de la biomasa aérea no viva debe hacerse determinando la biomasa de madera muerta y la biomasa de mantillo o necromasa. 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).

2.3.1. Biomasa de mantillo

La cantidad de mantillo en los suelos se conserva y aumenta por la producción espontánea de las plantas, a expensas de los despojos acumulados de estas. Arnaldos *et al* (2004) mencionan que las existencias de mantillo dependen tanto de las tasas de producción de cada tipo de comunidad vegetal, así como de las tasas de mineralización o descomposición. Además, esta capa de mantillo tarda tiempo en descomponerse, donde su velocidad depende del clima y del sustrato. La actividad de los descomponedores se incrementa con la temperatura y la humedad, y se reduce con la sequía. En ocasiones, la tasa de producción de mantillo es superior a la de descomposición por lo que se producen acumulaciones de materia seca sobre el suelo. Así es, que terrenos por mucho tiempo plantados de árboles se cubren de una capa de mantillo tanto más espesa: cuanto más poblado este el bosque, cuanto menos penetre la luz y cuanto más lentamente se efectúe la descomposición de los despojos.

La presencia de un mantillo vegetal altera muchas relaciones del suelo:

- a. Reduce la insolación la cual hace disminuir la temperatura y la evapotranspiración superficial del suelo, lo que mantiene temperaturas más apropiadas para el desarrollo de las plántulas, especialmente en épocas de sequía y ayuda a mantener la humedad en el suelo.
- b. Aumenta la materia orgánica, nutrimentos y actividad biológica cerca de la superficie, con una marcada estratificación a través del perfil, que favorece una mayor proliferación de las raíces del cultivo cerca de la superficie.
- c. Aísla la superficie del suelo, creando un microclima muy distinto debajo del mantillo (húmedo, temperatura baja, no insolación, no viento) que minimiza los efectos destructivos del ambiente sobre el suelo.
- d. Reduce la tasa de escurrimiento y erosión por agua y viento, por lo que aumenta la tasa de infiltración y disminuye la erosión.

- e. Previene la formación de costras superficiales, protegiendo la superficie del suelo del impacto de las lluvias e incrementa la infiltración (Bolaños 1988 citado en Taller de productividad y conservación de los recursos en la agricultura de las laderas 1995).

La biomasa de mantillo se determina extrayendo una muestra en un área específica y luego comparando los valores de peso verde y peso seco para obtener el peso seco (biomasa seca) (IPCC 2005).

2.3.2. Biomasa de madera muerta

De acuerdo con Delgado & Pedraza (2002), la 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.

La madera muerta cumple un papel importante en los procesos ecológicos del bosque al ser un eslabón en el ciclo de 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 & Piqué 2008), de la composición y estructura del bosque (Pozo *et al* 2009), así como del uso o manejo del mismo (Delgado & Peraza 2002). En diversos países, la madera muerta constituye una fuente importante de leña para las comunidades rurales.

Para los estudios de estimación de biomasa en la madera muerta se debe identificar de previo si es madera caída (está en contacto con el suelo) o en pie. Para estimar la madera caída, el método general consiste en estimar el volumen de los troncos por categoría de densidad de la madera y posteriormente convertirlo en biomasa.

Para esto existen dos métodos, en función de la cantidad prevista de madera muerta. (IPCC 2005).

Método 1: este se emplea cuando se considera que la cantidad de madera muerta representa una porción pequeña de la biomasa aérea (entre el 10 % y 15%). Para los cálculos, se definen dos líneas perpendiculares entre sí, de 50 m cada una, en el centro de la parcela de muestreo y se miden los diámetros de todos los troncos y ramas que se intersequen con dichas líneas. Posteriormente se clasifican los troncos por categoría de densidad; o bien, se toma una muestra en campo de la madera para calcular la densidad (IPCC 2005).

Método 2: este se utiliza cuando se prevé que la cantidad representará una proporción relativamente grande de la biomasa sobre el suelo (más de un 15%). Se recomienda medir toda la madera muerta encontrada en una subparcela de las parcelas de muestreo. Se calcula el volumen de cada troza de madera muerta caída dentro del círculo sobre la base de las mediciones de su diámetro tomadas a intervalos de 1m a lo largo de cada troza de madera muerta que se encuentre en la parcela. Luego se estima el volumen de cada troza como el volumen de un cilindro truncado, sobre la base del promedio de los dos diámetros medidos y la distancia entre ellos. Al igual que en el método 1, cada troza de madera muerta se clasifica también en una categoría de densidad. Se suman los volúmenes de cada categoría de densidad usando el factor apropiado (sobre la base de la superficie de la parcela) expresándolo en m³/ha para cada categoría (IPCC 2005).

2.4. Carbono en suelo

2.4.1. Carbono en el suelo y materia orgánica

Según la Soil Science Society of America (1973), citado por Núñez 2000, se define como materia orgánica “la fracción orgánica del suelo que incluye los residuos provenientes de plantas y animales que se encuentran en el suelo en diferentes etapas de descomposición”, conteniendo residuos frescos, parcialmente descompuestos y totalmente descompuestos.

Los suelos de los bosques pueden almacenar grandes cantidades de carbono que podría liberarse a la atmósfera por la deforestación (Houghton *et al.*, 1983 citado por IPCC 2000). Por ejemplo, Brown y Lugo (1990) informaron que en las zonas de vida húmedas y secas, sitios cultivados después de haber sido deforestados normalmente pierden 60-70 por ciento del carbono inicial contenido en los bosques maduros. Además, la disponibilidad o la cantidad de C que se encuentre en el suelo van a depender de la materia orgánica que este posea y la densidad aparente del mismo.

Los componentes mayoritarios de la materia orgánica generalmente son lignina, hidratos de carbono, proteínas, péptidos y aminoácidos libres, grasas, ceras y resinas. El porcentaje de materia orgánica determinado en un suelo se relaciona con la cantidad añadida de residuos frescos, forma y composición de los tejidos y posterior transformación por los microorganismos. La cantidad adicional se relaciona con la abundancia y naturaleza de la vegetación, lo que incluye clima (temperatura y precipitación) que afectan la producción de biomasa. De acuerdo con Armson (1977) y Hardy (1970), citados por Núñez 2000, estas sustancias se descomponen en el suelo en un tiempo relativamente corto en condiciones de trópico húmedo: de 6 a 12 meses.

Según Armson (1977), citado por Núñez (2000) el relieve también afecta la acumulación en áreas planas o depresionales y la pérdida por arrastre en el agua de escorrentía en lugares inclinados de relieve abrupto.

2.4.2. Carbono en suelo y densidad aparente del suelo

La densidad aparente del suelo es la relación que existe entre la masa del sólido y el volumen total ocupado por el sólido y por el espacio poroso. La masa del sólido se determina pesando la muestra a 105°C, y el volumen total se deduce del cilindro que fue utilizado para la toma de muestras (Soriano 2001).

Thompson *et al* (1988), definen densidad aparente como el peso de los sólidos del suelo por unidad de volumen total del mismo. En el caso del volumen de poros, este es una parte del volumen de suelo medido para la estimación de la densidad aparente. Las muestras deben ser secadas para extraer el agua contenida en el suelo antes de su pesada.

Para determinar la densidad aparente del suelo se pueden realizar dos distintas metodologías. Una requiere la utilización de equipo que genere radiaciones (sin embargo, deberán realizarse cálculos para eliminar los valores de contenido de agua en suelo que se obtienen) y el otro método, más empleado, es el del cilindro metálico.

Este último método, utiliza un cilindro de paredes delgadas y rígidas con borde biselado hacia el exterior, aproximadamente de unos 100 cm³. La técnica consiste en extraer una muestra clavando el cilindro en el horizonte a estudiar. Luego la muestra se lleva a un horno o estufa de desecación a 102 °C por 24 horas y luego se pesa para obtener el peso seco de la muestra (Porta 2003; Soriano 2001).

Los datos de densidad aparente del suelo deben ser expresados necesariamente en unidades de peso y volumen. El tipo de unidades que se emplee es indiferente siempre que estén bien especificadas, sin embargo, las más empleadas son los gramos por centímetro cúbico (g/cm³) (Thompson 1988).

La densidad aparente de los horizontes A en suelos minerales suele variar entre 1,0 y 1,6 g/cm³, mientras que la de suelos orgánicos es menor, y puede alcanzar 0,1 g/cm³ en turbas de esfagnos (musgos). En este caso, la mayor parte de las variaciones provienen de diferencias en el volumen total de poros. Se aplica como regla general que los suelos de textura fina tienen mayor porosidad y menor densidad aparente que los suelos arenosos. La densidad aparente puede variar según el grado de compactación del suelo, ya que la compresión del suelo hace descender su volumen de poros y aumenta su peso por unidad de volumen (Thompson 1988).

La densidad aparente del suelo puede variar por la cantidad de materia orgánica que se haya en el ecosistema. Esta hace descender la densidad aparente ya que incrementa la estabilidad de los agregados del suelo, por lo que suelos ricos en materia orgánica, presentarán una menor densidad aparente (Thompson 1988). Por otro lado, suelos con menos cantidad de materia orgánica tienen mayor densidad aparente.

2.5. Estudios de biomasa y carbono en el suelo

Según Jackson (2000) 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. Según Dixon *et al* (1994), citado por IPCC (2006) a nivel mundial, los suelos forestales minerales contienen aproximadamente 700 Gt C (1Gt = mil millones de toneladas), aunque los depósitos de C orgánico no son estáticos debido a las diferencias entre las entradas y las salidas de C ocurridas a través del tiempo. En gran parte, las entradas están determinadas por la productividad forestal, la descomposición de la hojarasca y su incorporación al suelo mineral y la subsiguiente pérdida producida por la mineralización/respiración (Pregitzer, 2003 citado por IPCC 2006). Hay otras pérdidas de C orgánico del suelo que se producen por la erosión o por la disolución

de C orgánico que se lixivia a las aguas subterráneas o se pierde por el flujo por tierra. 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 (IPCC 2006).

En un estudio realizado por Cifuentes *et al* (s.f.) en Costa Rica, se encontró que la cantidad de C almacenada en los primeros 30 cm del suelo en bosques primarios varía entre 57,80 y 127,44 Mg C/ha. En ese estudio se efectuaron análisis por zona de vida, donde el Bosque pluvial Premontano y pluvial Montano Bajo acumulan más C en el suelo, con 127,00 y 127,44 Mg C/ha, respectivamente. En otro estudio realizado por Post *et al* (s.f.), citado por Cifuentes *et al* (s.f.), se encontró que los depósitos de C son mayores conforme aumenta la precipitación promedio anual, y que en el suelo de pastizales son mayores comparado con bosques primarios, específicamente en las zonas de vida de Bosque muy húmedo Tropical y Bosque pluvial Montano Bajo. Además Post *et al* (s.f.) encontraron que los depósitos de C en suelos de bosque secundario son similares a los de depósitos de bosque primario.

En otro estudio realizado por Herrera *et al* (2001) se encontró que el carbono promedio obtenido para hojarasca fina es de 3,11 t/ha y representa el 9,18% del C total² en tanto que 0,911 t/ha se encontraron en madera muerta lo que representa un 3,81%.

² De acuerdo con Herrera *et al* (2001) el C total se refiere al carbono almacenado sobre el suelo en: vegetación herbácea y leñosa pequeña, detritos de madera gruesa, hojarasca fina, y árboles muertos en pie. El cual fue de 111,12 t/ha en bosques primarios intervenidos y 23,68 t/ha en bosques sucesionales.

III. Materiales y Métodos

3.1. Aspectos generales de los sitios

3.1.1. Ubicación de los sitios de muestreo

Durante el 2009, 2010 y 2011 se establecieron veinte parcelas permanentes de monitoreo (PPM) en diferentes sectores de la Península de Osa: Río Piro, Matapalo, Los Mogos y Bahía Chal. Estas parcelas se establecieron como 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. En cada uno de los diferentes sectores se localizan parches de bosques de propiedad privada que se encuentran en diferentes estadios sucesionales (Morales 2010). La ubicación exacta de las parcelas se muestra en las figuras 1 y 2.

Parcelas Permanentes de Monitoreo en el Sector Río Piro y Cabo Matapalo en la Península de Osa

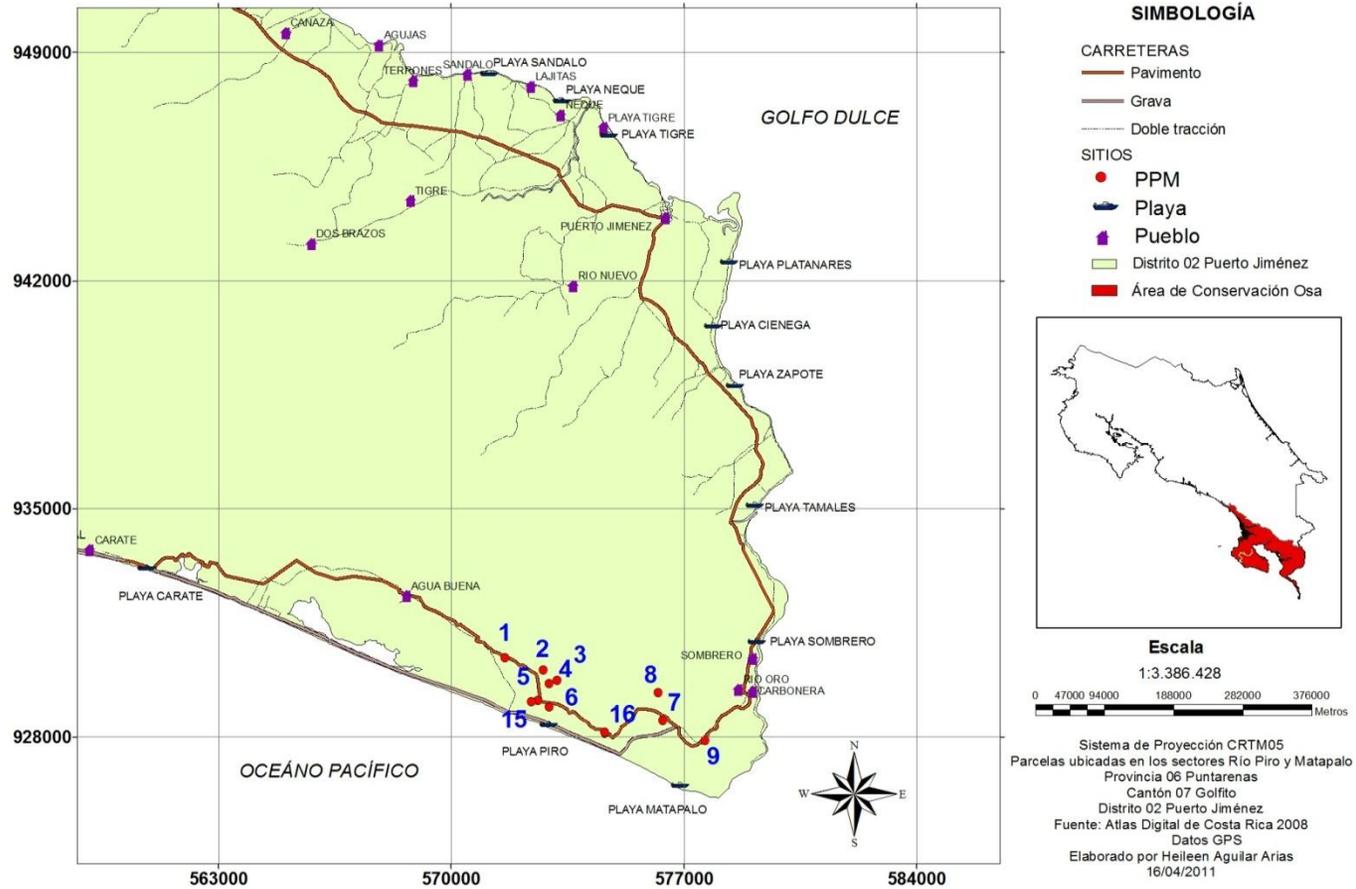


Figura 1. Ubicación de Parcelas Permanentes de Monitoreo en el Sector de Río Piro y Matapalo, Península Osa, Costa Rica.

Parcelas Permanentes de Monitoreo en el Sector Los Mogos y Bahía Chal en la Península de Osa

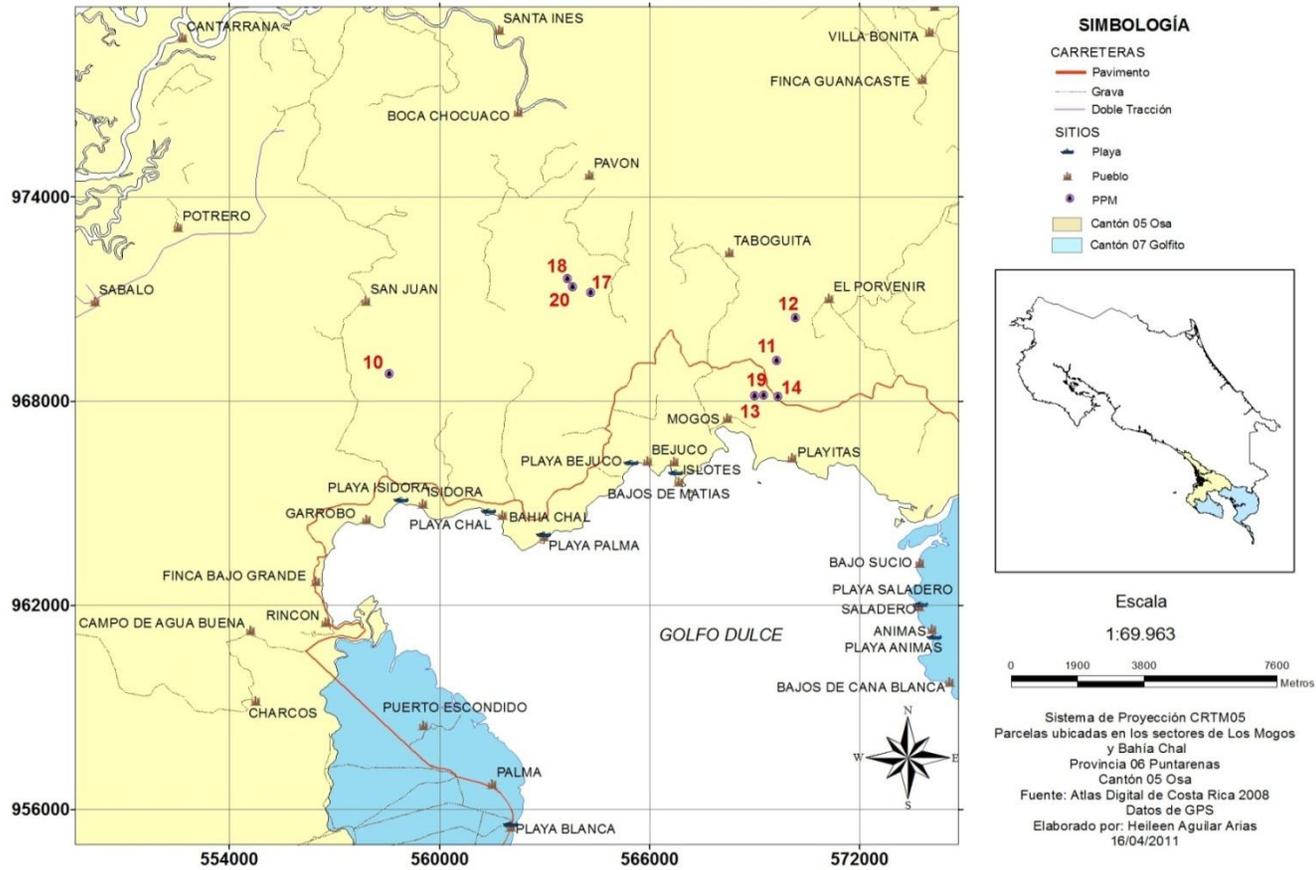


Figura 2. Ubicación de las Parcelas Permanentes de Monitoreo en el Sector de Los Mogos y Bahía Chal, Península Osa, Costa Rica.

En el año 2009 se definió una cronosecuencia de bosques tropicales de acuerdo a cuatro estadios sucesionales los cuales abarcan las edades de 5-15 años, 15-30 años, mayores de 30 años y bosque primario. Para cada estadio se establecieron cinco repeticiones. Actualmente la distribución y localización de las PPM es la siguiente:

Cuadro 1. Ubicación de las veinte parcelas permanentes de muestreo en diferentes sectores de la Península de Osa, Puntarenas, Costa Rica 2010. Fuente: Ortega 2011.

Estadio de sucesión	Región	Sitio	PPM	n (subtotal)
5-15 años	Matapalo	Sitio Bert Kastteter	7	1
	Los Mogos	Propietario ELVIN	12	1
	Los Mogos	Propietario ELVIN	14	1
	Los Mogos	Alfonso Durán	17	1
	Los Mogos	Alfonso Durán	20	1
			Total	5
15-30 años	RIO PIRO	Sitio La U	1	1
	RIO PIRO	Sendero terciopelo	5	1
	MATAPALO	Lapa Ríos	9	1
	MOGOS	Alfonso Durán	18	1
	MOGOS	Elvin Campos	19	1
			Total	5
> 30 años	RIO PIRO	Sendero Los Higueros	4	1
	RIO PIRO	Sendero piro	6	1
	MOGOS	Propiedad El Tucán	11	1
	RIO PIRO	Sendero Terciopelo- Las Rocas	15	1
	RIO PIRO	Finca Manuel Ramírez	16	1
			Total	5
Primario	RIO PIRO	Laguna Silvestre	2	1
	RIO PIRO	Sendero Los Higueros	3	1
	MATAPALO	Finca Manuel Ramírez	8	1
	MOGOS	Servicentro Río Claro	10	1
	MOGOS	Elvin Campos	13	1
			Total	5
Gran Total				20

3.1.2. Caracterización biofísica de los sitios de muestreo

3.1.2.1. Clima

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 tipos de clima que describe Kappelle *et al* (2002), citado por Morales (2010) para el Área de Conservación Osa (ACOSA) son de diversos tipos, donde se encuentra clima muy húmedo, muy caliente, con una estación seca corta (menor a 35 días), con temperatura media anual entre los 23 y 27 °C, la precipitación media anual de 3420-6840 mm, siendo una de las áreas más lluviosas del país con estación seca de enero a marzo, característica de Parque Nacional Corcovado.

En el delta de los ríos Térraba y Sierpe, entre los meses de enero y marzo se presenta un clima muy húmedo muy caliente, con una estación seca moderada entre 35 a 75 días de déficit de agua, con una precipitación media anual de 3420 a 6840 mm. En la Fila Costeña se identifica entre los meses de enero hasta mediados de abril otro tipo de clima caracterizado por muy húmedo, caliente con una estación seca corta con menos de 35 días con déficit de agua y temperatura promedio anual de 18 a 26 °C y precipitación media anual de 2840 a 6840 mm. Según Morales (2010) los sitios donde se ubican las PPM se ven influenciados por estos tipos de clima.

3.1.2.2. Suelos y topografía

Según el Atlas Digital de Costa Rica 2008, en los sitios en estudio se presentan dos órdenes de suelos: ultisoles con horizonte arílico (20% de aumento en el contenido de arcillas en la sección de control) con menos de un 35% de saturación de bases en la sección de control, generalmente profundos, terreno fuertemente ondulado con pendientes de (30 a 60)%; e inceptisoles, caracterizados por un suelo joven con horizonte B cambio (apenas se forma B), sin otro horizonte diagnóstico, terreno suavemente ondulado y pendientes de (2 a 15)% (Morales 2010).

3.1.2.3. Caracterización ecológica de los sitios de estudio

Los sitios de estudio 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).

En los sitios de muestreo Morales (2010) encontró un total de 66 familias, 227 géneros y 432 especies; donde 26 de las especies son endémicas de Costa Rica y 46 se categorizan en algún grado de amenaza. Algunas de las especies que se pueden encontrar en los sitios son *Alchornea costaricensis*, *Anacardium excelsum*, *Apeiba tibourbou*, *Caryocar costarricense*, *Castilla tunu*, *Chimarrhis parviflora*, *Goethalsia meiantha* y *Guazuma ulmifolia*, por mencionar algunas.

3.2. Diseño del muestreo

El trabajo se estableció en un diseño simple aleatorio con sub-muestreo, con igual número 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. En el cuadro 2 se presenta la descripción de los estadios sucesionales establecidos para el muestreo.

Cuadro 2. Descripción de los estadios sucesionales establecidos en el diseño de muestreo en bosques de la Península de Osa, Puntarenas, Costa Rica, 2010. Fuente: Adaptado de Morales 2010.

Estadio (tratamiento)	Edad (años)	Repeticiones (n)	Descripción del sitio
1	5-15	5	potreros recientemente abandonados
2	15-30	5	bosque secundario joven
3	>30	5	bosque secundario maduro
4	primario	5	bosque primario

Las 20 parcelas existentes tienen un área de 5000 m² (50x100m), subdivididas en sub parcelas de 10x10m, para un total de 50 sub-parcelas numeradas en forma consecutiva del número 1 hasta el 50.

3.3. Toma de muestras

3.3.1. Metodología para biomasa sobre el suelo

La determinación de la biomasa sobre el suelo contempla 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.

3.3.1.1. Mantillo: se montaron cuatro parcelas temporales de $0,5 \text{ m}^2$ (40 cm de radio), en cada parcela de monitoreo. Estas cuatro parcelas fueron ubicadas en las cuatro esquinas de cada parcela (ver Anexo 8). Una vez ubicadas las parcelas temporales se recolectó de manera manual todo el material vegetal que estaba dentro del área del círculo (hojas, ramas y ramillas) menores a 10 cm de diámetro, luego se procedió a pesar y registrar el valor en una hoja de apunte. Seguidamente de cada una de las muestras se seleccionó una submuestra representativa mayor o igual a 100 g, bien mezclada. Luego cada submuestra fue pesada y registrada nuevamente; y depositada en una bolsa de plástico para su transporte al laboratorio. Cada una de las submuestras fue llevada al Centro de Investigación Bosque Industria (CIIBI) del Instituto Tecnológico de Costa Rica donde 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 de las muestras de campo se dividió el peso seco final de la muestra secada al horno con el peso inicial en el momento de la colecta en campo, y de esta manera se obtuvo un coeficiente (k) de materia seca, que se multiplicó con el valor del peso fresco obtenido en campo resultando el peso seco de las muestras.

3.3.1.2. Madera muerta: se montaron cuatro parcelas temporales de 5,65 m de radio (100 m²) tomando como base las esquinas de las sub-parcelas 21, 22, 23 y 24 de cada parcela establecida (ver Anexo 8). 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 (ver Ecuación 1). De cada árbol medido se tomó una muestra para poder 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 2). Una vez obtenida la densidad y el volumen de cada árbol medido se calculó la biomasa seca de cada muestra (ver Ecuación 3). 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 0,01ha.

$$V = (A_1 + A_2) \frac{L}{2} \quad \text{(Ecuación 1)}$$

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)

$$d = \frac{P_{seco}}{V_{verde}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

d = densidad de la muestra (g/cm^3)

P_{seco} = peso seco de la muestra (g)

V_{verde} = volumen de la muestra obtenido por desplazamiento (cm^3)

$$B = v * d \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

B : es la biomasa seca (g)

V : es el volumen obtenido de cada troza según la fórmula Smalian (Prodan 1997) (cm^3)

d : es la densidad de la madera obtenida a partir de la muestra de campo (g/cm^3)

3.3.2. Metodología para carbono en suelo

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

$$COS = (\%COS) * densidad\ aparente * profundidad * fragmentos\ gruesos * 10 \quad \text{(Ecuación 4)}$$

Donde:

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

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

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

Profundidad³= espesor o profundidad del suelo para la muestra, m

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

Finalmente se debe de 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 formula se describe a continuación.

3.3.2.1. Porcentaje de carbono en el suelo

En las sub-parcelas 17,19, 27 y 29, se seleccionaron cuatro sitios al azar hacia el centro de cada sub-parcela (Anexo 8). 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.

³ La profundidad fue igual para todas las muestras de carbono, equivalente a 30 cm.

3.3.2.2. Densidad aparente

La densidad aparente es igual al peso seco del suelo (en gramos) entre el volumen del suelo (en cm^3).

En las mismas parcelas donde se recolectó la muestra de suelo para carbono (C%) se hizo el muestreo para densidad. Para la determinación de la densidad aparente 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 5cm de profundidad, con un volumen de 100 ml. El cilindro fue introducido en el suelo de manera vertical a tres profundidades: de 0-10, 10-20, y 20-30 cm para lo cual se utilizó un mazo de acero de manera que el cilindro se introdujera completamente en el suelo, luego se extrajo el cilindro del suelo con una pala y seguidamente se eliminó el sobrante de suelo que quedaba en 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, 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. Luego de esto cada una de las muestras se pesó y se obtuvo el valor de peso seco en gramos.

3.3.2.3. Fragmentos gruesos

Para hacer uso de la ecuación 4, se debía determinar el porcentaje de fragmentos gruesos, para lo cual se hizo uso de la “Metodología Determinación Capacidad Uso Tierras Costa Rica” (Decreto N° 23214-MAG-MIRENEM), con la que se determinó la pedregosidad en cada una de las parcelas, basándose en siete categorías existentes.

3.4. Análisis de datos

En cada una de las parcelas permanentes de monitoreo se efectuaron cuatro repeticiones para obtener las muestras de biomasa de mantillo y madera muerta, y carbono en el suelo. Como las unidades de muestreo eran inferiores a 10000 m² todos los valores fueron extrapolados a hectárea y expresados como toneladas por hectárea.

Para cada una de las variables en estudio, se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) para un factor, cuatro tratamientos y cinco repeticiones por tratamiento, con el fin de encontrar diferencias significativas o no, entre los estadios de sucesión.

Partiendo de la hipótesis sugerida y teniendo los resultados del ANDEVA se procedió a efectuar una comparación entre medias muestrales, mediante el uso de la prueba de Diferencia Mínima Significativa (DMS) con un alfa de 0,05. El programa estadístico que se utilizó fue el Statistix 9.0 (Copyright (C) 1985-2008 Analytical Software)

IV. Resultados y discusión

4.1. Biomasa sobre el suelo

4.1.1. Biomasa de Mantillo

En los diversos estudios que se efectúan sobre distintos ecosistemas, es necesario hacer inventarios de las diferentes unidades a estudiar dentro del ecosistema, tal como materia orgánica, nitrógeno, carbono, etc; subdividiendo entonces el ecosistema en los diferentes compartimentos, a saber: el bosque como tal, la capa de mantillo y el suelo mineral (Fassbender 1984). En el caso de la capa de mantillo se refiere a los residuos vegetales de cualquier naturaleza (tallos, frutos, ramas, hojas y raíces) que bajo una vegetación permanente caen o se acumulan periódicamente y se incorporan al suelo por medio de procesos de mineralización y humificación (Labrador 1996 citado por Altamirano 2005). Estos residuos contribuyen a la fertilidad y protección al suelo de la erosión y mantienen una condición de humedad durante la época seca, evitando el desgaste excesivo de los suelos; por lo que su determinación permite conocer las reservas orgánicas y minerales acumuladas en el ecosistema (Fassbender 1984, Bolaños 1988).

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 un estudio efectuado por Grimm & Fassbender (1981); citados por Fassbender (1984) se reporta un total de 39,60 t/ha para la biomasa de mantillo, la cual divide 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).

En esta investigación el valor promedio de biomasa de mantillo encontrado para bosques de la Península de Osa corresponde a 7,31 t/ha, similar al reportado por Grimm & Fassbender (1981) para la capa de mantillo reciente. En una investigación efectuada por Chacón *et al* (2007), en bosques secundarios de la Región Atlántica de Costa Rica la capa de mantillo fue de $(0,10 \pm 0,02)$ t/ha, valores que se encuentran muy por debajo de los hallados en este trabajo.

En el cuadro 3 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 con forme 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 30 años.

Cuadro 3. 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 (%)	Letra*
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	a
Promedio	7,31	2,26	30,96	-

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

El cuadro 3 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 maduros (ver Anexo 6).

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 este estudio. Las existencias de mantillo dependen de las tasas de producción de cada tipo de comunidad vegetal y las tasas de mineralización o descomposición y que esta capa de mantillo tarda tiempo en descomponerse, y su velocidad depende del clima y el sustrato. La actividad de los descomponedores se incrementa con la temperatura y la humedad y se reduce con la sequía. En ocasiones, la tasa de producción de mantillo es superior a la de descomposición y entonces se producen acumulaciones de materia seca sobre el suelo (Arnaldos *et al* 2003).

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. Este comportamiento descrito por Fournier (1989) se puede ver reflejado en la figura 3.

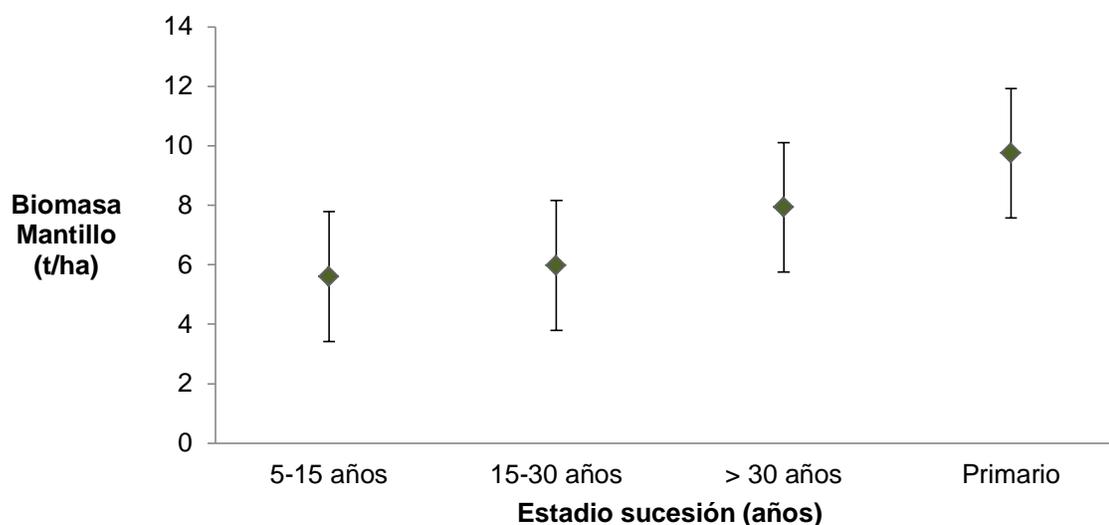


Figura 3. Biomasa promedio (t/ha) de mantillo para cuatro estadios de sucesión en bosques de la Península de Osa, Puntarenas, Costa Rica 2011. Las líneas verticales representan la DMS.

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 3), donde los bosques primarios acumulan más biomasa y son estadísticamente distintos ($\alpha=0,05$) a bosques de sucesión temprana (5-15 años) (ver Anexo 1).

4.1.2. Biomasa de madera muerta (caída)

La madera muerta se reconoce como un componente muy importante en los ecosistemas boscosos ya que puede llegar a representar cantidades significativas de la biomasa total del bosque y además es un depósito importante de carbono (Delaney *et al* 1998). La determinación adecuada de la biomasa de un bosque, es un elemento de gran importancia debido a que ésta permite determinar los montos de carbono y otros elementos químicos existentes en cada uno de sus componentes (Schlegel *et al* 2000).

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 muestran una variación de 0 a 89,60 t/ha para todos los datos. 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 encuentran en un rango de 1-77 t/ha.

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. 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.

En el cuadro 4 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 ($\alpha=0,05$).

A partir de la figura 4 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 acumulada. 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 (Anexo 2).

Cuadro 4. 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 sucesión	B (t/ha)	S	CV (%)	Letra
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

Delaney *et al* (1998) en su estudio reportan 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 otro lado, 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.

Herrera *et al* (2001) mencionan que estos valores son bajos comparados con otros autores, explicando que los bosques primarios de la zona pueden no estar aún en un equilibrio en donde los árboles muy viejos y de grandes dimensiones mueran y caigan. En esta investigación los valores promedio de biomasa seca para el componente madera muerta por edad, son similares a lo reportado por Herrera *et al* (2001) (Figura 4).

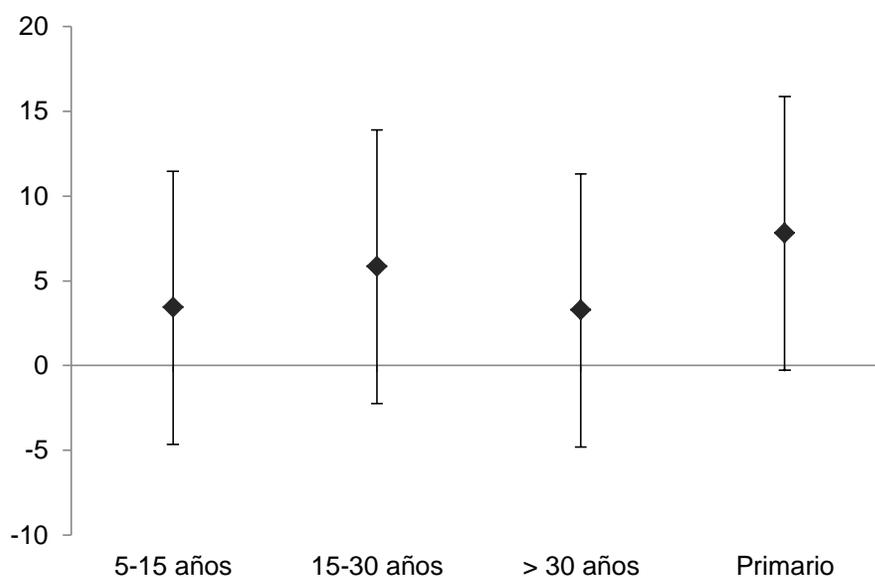


Figura 4. Biomasa promedio (t/ha) de madera muerta para cuatro estadios de sucesión en bosques de la Península de Osa, Puntarenas, Costa Rica 2011. Las líneas verticales indican la DMS.

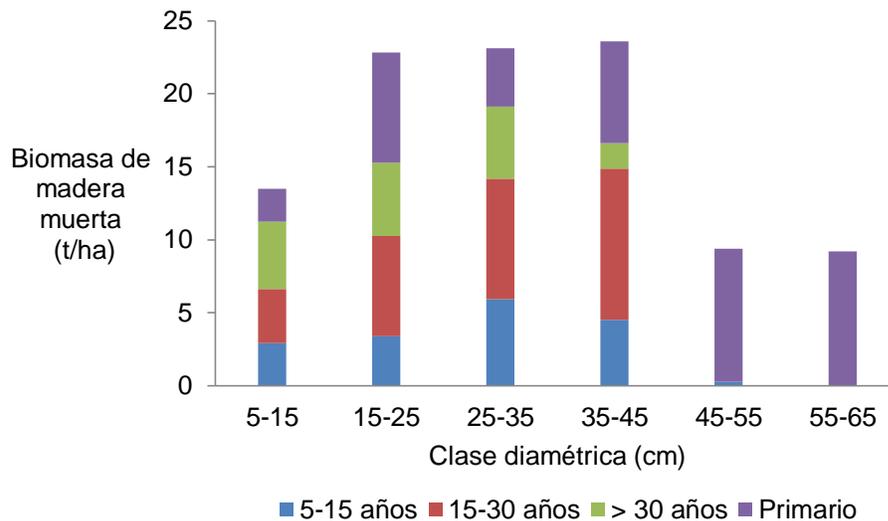


Figura 5. Biomasa promedio de madera muerta (t/ha) por clase diamétrica en unidades de 0,01ha para bosques de diferentes estadios sucesionales en la Península de Osa, Puntarenas, Costa Rica 2011.

La figura 5 ilustra el comportamiento de los árboles medidos en campo. Se puede observar que para todos los estadios de sucesión es posible encontrar árboles muertos en las clases diamétricas inferiores. Mientras que árboles muertos más grandes (55-65 cm) sólo se ubican en el estadio de bosque primario. Por otro lado, a pesar de que los bosques de 15-30 años no tienen individuos mayores a 45 cm de diámetro en el componente de madera muerta, la cantidad que se acumula en las categorías inferiores es superior a la de bosques de 5-15 años y mayores de 30. Asimismo se puede observar una poca presencia de individuos grandes en bosques de 5-15 años. Con esta figura se puede ver que los árboles grandes no hacen aporte a la biomasa de madera muerta de todos los estadios, por lo que los resultados de este estudio para biomasa de madera muerta concuerdan con lo dicho por Herrera *et al* (2001) acerca del equilibrio en la caída de la madera.

4.2. 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. De acuerdo con Núñez (2000), 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 2000). En esta investigación 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 5). La prueba estadística demostró que existen diferencias significativas en la densidad aparente en bosques de 15-30 años respecto bosques primarios ($\alpha=0,05$).

Cuadro 5. 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 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 2000). 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 representan 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 5). Sin embargo, la prueba estadística no demostró existencia de diferencias en el %COS con respecto a la edad del bosque ($\alpha=0,05$) (Anexo 5).

Los valores de COS (para una profundidad de 30cm) 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 6. 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 sucesión	COS (tC/ha)	S	CV (%)	Letra*
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 mayores valores de contenido de carbono orgánico en el suelo por estadio de sucesión se observan en la edad de bosques mayores a 30 años (109,24 t/ha), siguiéndole en orden los bosques primarios (92,29 t/ha), bosques de 15 a 30 años (88,01 t/ha) y por último con menos contenido de COS bosques de 5 a 15 años (78,49 t/ha) (Figura 6).

Al efectuar una prueba de DMS se encontró que estadísticamente existe diferencia significativa en los contenidos de carbono en el suelo para bosques de 5-15 y mayores de 30 años ($\alpha=0,05$).

El cuadro 6 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 no existe diferencia significativa en el contenido de carbono acumulado en los suelos de los bosques de sucesión temprana respecto a la de bosques maduros (ver Anexo 6).

La figura 6 nos muestra una relación positiva del aumento del contenido de COS conforme la edad del bosque hasta los 30 años, ya que luego de esta edad se observa una disminución en el contenido de COS. 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.

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).

Del mismo modo Cifuentes *et al* (S.f.) explican que en Bosque seco Tropical hay mayor acumulación de carbono en el suelo que en Bosque muy húmedo tropical y le atribuyen la causa a la humedad disponible en el suelo del Bosque húmedo Tropical. Esta condición de humedad es suficiente para no detener completamente la descomposición de materia orgánica, aún durante la época seca, con 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.

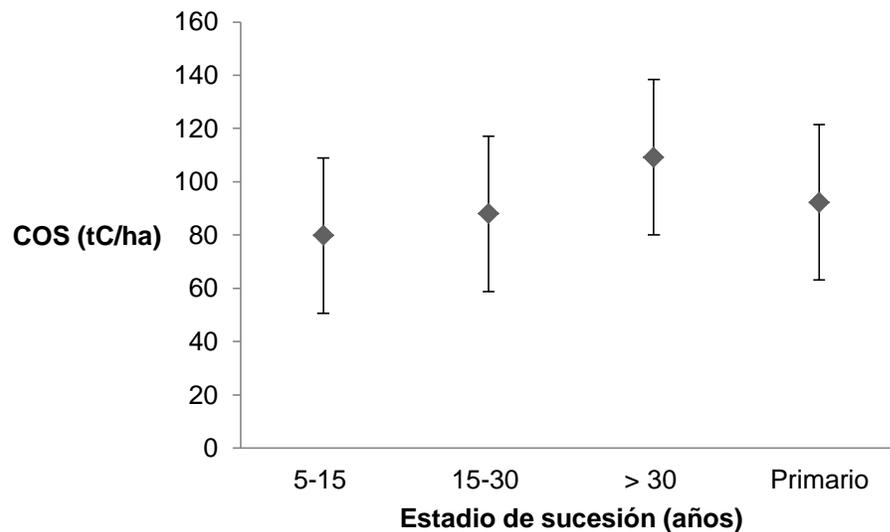


Figura 6. Carbono promedio (tC/ha) en el suelo cuatro estadios de sucesión en bosques de la Península de Osa, Puntarenas, Costa Rica 2011.

Estos valores promedio de COS (tC/ha) se comportan similar al %COS (Cuadro 5) para los bosques mayores de 30 años y los primarios. Mientras que en los bosques más jóvenes no sucede 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 lixiviarse.

En Sarapiquí, Powers & 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 km²). Similar a lo reportado por Schedlbauer & 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 30cm 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) (cuadro 6).

V. Conclusiones

- El bosque primario posee la mayor cantidad de biomasa acumulada en la capa de mantillo (9,75 t/ha) seguido de los estadios > 30 años (7,93 t/ha), 15-30 años (5,97t/ha) y 5-15 años (5,60 t/ha).
- La biomasa seca de madera muerta en los bosques de la Península de Osa arrojó los siguientes resultados: 7,80 t/ha en bosques primarios, 5,84 t/ha en el estadio de 15-30 años, 3,42 t/ha en el estadio de 5-15 años y por último de 3,26 t/ha en bosques mayores de 30 años.
- La mayor cantidad de C almacenado en el suelo corresponde al estadio de bosque > 30 años (109,24 tC/ha), siguiéndole bosque primario (92,29 tC/ha), 15-30 años (88,01tC/ha) y 5-15 años (78,48 tC/ha).
- Los bosques primarios acumulan distinta cantidad de biomasa en el componente de mantillo respecto a los bosques de 5-15 años.
- La biomasa seca acumulada en la madera muerta no presenta variación real en ninguno de los estadios de sucesión de bosque.
- El contenido de carbono orgánico del suelo almacenado en bosques mayores de 30 años es distinta a la de bosques de 5-15 años.
- Las tendencias mostraron un aumento en el contenido de biomasa sobre el suelo y el carbono orgánico del suelo como un incremento conforme avanza el estadio sucesional del bosque.

VI. Recomendaciones

- Realizar estudios que involucren las características físico-químicas del suelo, que permitan explicar mejor las relaciones de acumulación de biomasa y carbono.
- Continuar estudios de biomasa de raíces para obtener resultados de todos los componentes del ecosistema, y determinar el carbono almacenado en cada componente.
- Monitorear la caída de materia orgánica durante un año y obtener valores de las tasas de acumulación y descomposición de materia orgánica, así como la acumulación de otros nutrientes que permitan conocer mejor la dinámica de cada ecosistema.
- Estudiar y comparar las relaciones entre época seca y lluviosa, para los distintos componentes de biomasa y carbono.
- Realizar un estudio de valoración del servicio ambiental para que los dueños de las propiedades conozcan la relación costo-beneficio que implica mantener el uso actual de sus terrenos.
- Incorporar la biomasa de madera muerta en pie, para poder estudiar mejor las tendencias de acumulación de este componente en los diferentes estadios sucesionales de bosque.

VII. Bibliografía

Altamirano, J.A. 2005. Biomasa y nutrientes de mantillo en diferentes sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en el municipio de Masatepe. Managua, Nicaragua. Universidad Nacional Agraria. 56p

Arnaldos, J; Navalón, X; Pastor, E; Planas, E; Zárate, L. 2004. Manual de ingeniería básica para la prevención y extinción de incendios forestales. Madrid, ES. Ediciones Mundi-Prensa S.A. 414p.

Bolaños, J. 1988. Suelos en relación a la labranza de conservación: aspectos físicos. **In** Labranza de conservación en maíz, (11th, 1989, El Batán, MX). Seminario. Eds. Héctor Barreto, Robert Raab, Armando Tasistro, Alejandro D. Violic. PROCIANDINO. 195p.

Brown, S. & Lugo, A.E. 1990. Tropical secondary forests. (en línea). Journal of Tropical Ecology. 6:1-32. Consultado 28 oct. 2010. Disponible en <http://www.winrock.org/ecosystems/files/TropicalSecondaryForests1990.pdf>

Buxó, R & Piqué, R. 2008. Arqueobotánica. Los usos de las plantas en la península Ibérica. Barcelona, ES. Ariel, S.A. 300p.

CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y enseñanza). 2008. Guía para el diseño de proyectos MDL forestales y de bioenergía (en línea). Eds Zenia Salinas, Paulo Hernández. Turrialba, CR. CATIE. 234p. Consultado 20 abr. 2011. Disponible en <http://www.serna.gob.hn/portal%202010/cc/cc%20actualizado/Guia%20para%20dise%20no%20de%20proyectos%20MDL-%20CATIE.pdf>

Centeno, J. 1992. El efecto Invernadero. PLANIUC. 11 y 12 (18-19): 75-96.

Chacón, P; Leblanc, H.A. & Russo, R.O. 2007. Fijación de carbono en un bosque secundario de la región tropical húmeda de Costa Rica (en línea). EARTH (Escuela de Agronomía de la Región Trópico Húmedo). 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_Chacon.pdf

Chazdon, R. & Montgomery, R. A. 2002. La adquisición de carbono en las plantas. **In: Ecología** y conservación de bosques neotropicales. Eds. Guariguata, M; Kattan, G. Cartago, CR. Ediciones LUR. 692p.

Ciesla, W. 1996. Cambio climático bosques y ordenación forestal: Una visión de conjunto. Roma, IT. FAO. 146p.

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>

Delgado, L & Pedraza, R.A. 2002. La madera muerta de los ecosistemas forestales. Foresta Veracruzana. 4 (2): 59-66.

Delaney, M; Brown, S; Lugo, A.E; 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.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informes sobre recursos mundiales de suelos. Roma, IT. FAO. 83p Consultado 19 abr. 2011. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/005/Y2779S/y2779s00.HTM>

Fassbender, H.W. 1984. Bases edafológicas de los sistemas de producción agroforestales. Turrialba, CR. CATIE. 192p.

Fassbender, H.W; Bornemisza, E. 1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. San José, CR. IICA. 420 p.

Forsythe, W. 1975. Física de suelos. Manual de laboratorio. San José, CR. IICA. 212p.

Gasparri, I. & Manghi, E. 2004. Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono de las regiones forestales argentinas. (en línea). Informe Final. Secretaría de Ambiente y Desarrollo, Dirección de Bosques, República Argentina Ministerio de Salud y Ambiente. AR. Consultado 19 abr. 2011. Disponible en http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/UMSEF/File/volumen_biomasa_carbono.pdf

González, M. 2008. Estimación de biomasa aérea y la captura de carbono en regeneración natural de *Pinus maximinoi* H.E. Moore, *Pinus oocarpa* var. *Ochoterenai* Mtz. y *Quercus* sp. en el norte del Estado de Chiapas, México. Tesis M.Sc. Turrialba, CR. CATIE. 97p.

Herrera, M.A; del Valle, J.I. & Orrego, S.A. 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, CH). Simposio Internacional. Consultado 20 oct. 2010. Disponible en http://www.uach.cl/procarbono/pdf/simposio_carbono/28_Herrera.PDF

Hogan, K.P & Machado, J.L. 2002. La luz solar: consecuencias biológicas y medición. In: Ecología y conservación de bosques neotropicales. Eds. Guariguata, M; Kattan, G. Cartago, CR. Ediciones LUR. 692p.

IMN (Instituto Meteorológico Nacional). 2008. El clima, su variabilidad y cambio climático en Costa Rica. Proyecto Segunda Comunicación sobre Cambio Climático en Costa Rica. San José, CR. MINAET, IMN, PNUD, CRRH. 75p.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2000. Land Use, Land-Use Change Forestry. Eds. Robert T. Watson, Ian R. Noble, Bert Bolin, N. H. Ravindranath, David J. Verardo and David J. Dokken. Cambridge, UK. Cambridge University Press. pp 375.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. Climate Change 2001: Glosario de términos. Anexo B. Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. Metz, B., O.R. Davidson, R. Swart, y J. Pan. Cambridge, UK y US, Cambridge University Press. 752 p.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2005. Orientación sobre las buenas prácticas para uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura. Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático. Programa del IPCC sobre inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Consultado 7 oct. 2010. Disponible en <http://www.ipcc.ch>

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 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>

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Resumen Técnico. In Cambio Climático 2007: Mitigación. Contribución del Grupo de Trabajo III al Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. Eds. B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, L. A. Meyer. Cambridge, UK y NY. Cambridge University Press.

Louman, B. 2006. Impacto ambiental del aprovechamiento. In Aprovechamiento de impacto reducido en bosques latifoliados húmedos tropicales. Eds. Orozco, L; Brúmer, C; Quirós, D. Turrialba, CR. CATIE. 442p.

Lugo, A.E & Brown, S. 1992. Tropical forest as sinks of atmospheric carbon. Forest Ecology and Management 54: 239-255

Maddiken, K. G. 1997. A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Winrock International Institute for Agricultural Development. 87 p. Consultado 22 abr. 2011. Disponible en <http://202.99.63.183/tanhui/thjl/Winrock%20International%20%E7%A2%B3%E7%9B%91%E6%B5%8B%E6%8C%87%E5%8D%97.pdf>

Masera, O; Cerón, A; Ordóñez, A. 2001. Forestry mitigation options for Mexico: Finding synergies between national sustainable development priorities and global concerns. (on line). Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. (6): 291-312. Consultado 10 oct 2010. Disponible en http://www.oikos.unam.mx/CIEco/bioenergia/images/stories/Bioenergy/PDF/forestry_mitigation_options.pdf

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, CR. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 115 p.

Neumann, L; Zimmermann, B; Hall, J.S; 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. 2000. Fertilidad de suelos. Ciclo de macronutrientes. Curso de Fertiriego. Cartago, CR. ITCR, INA. s.p.

Núñez, J. 2000. Fundamentos de edafología. 3 reimp. de la 2 ed. San José, CR. EUNED. 185p.

Ortega, M. 2011. PPM de proyecto Biodiversidad Osa. (correo electrónico). Cartago, CR. CATIE. (E-mail: marco_vinicio_o@yahoo.com).

Powers, J.S. & Veldkamp, E. 2005. Regional variation in soil carbon and δ^{13} in forests and pastures of northeastern Costa Rica. Biogeochemistry 72:315-336. Consultado 10 abr. 2011. Disponible en <http://www3.cbs.umn.edu/labs/powers/powers2005b.pdf>

Pozo, J; Elosegí, A; Díez, J & Molinero, J. 2009. Dinámica y relevancia de la materia orgánica. **In:** Conceptos y técnicas en ecología fluvial. Eds. Elosegí, A. & Sabater, S. Bilbao, ES. Fundación BBVA. 444p

Prodan, M; Peters, F.C. & Real, P. 1997. Mensura forestal. San José, CR. GTZ, IICA. 586 p

Segura, M; Kanninen, M. 2002. Inventarios para estimar carbono en ecosistemas forestales tropicales. **In:** Inventarios Forestales para bosques latifoliados en América Central. Eds. Orozco, L; Brumér, C. Turrialba, CR. CATIE. pp. 202-213.

Segura, M.A; Sánchez, P; Ortiz, C.A. & Gutiérrez, M. C. 2005. Carbono orgánico de los suelos de México. Terra Latinoamericana. 23 (1):21-28. Chapingo, MX. Universidad Autónoma. Consultado 15 abr. 2011. Disponible en <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=57323103>

Schedlbauer, J.L. & Kavanagh, K.L. 2008. Soil carbon dynamics in a chronosequence of secondary forests in northeastern Costa Rica. Forest Ecology and Management 255: 1326-1335.

Schlegel, B; Gayoso, J. & Guerra, J. 2000. Medición de la capacidad de capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Manual de procedimientos muestreos de biomasa forestal. Universidad austral de Chile. Valdivia, Chile. 26 p. Consultado 28 abr. 2011. Disponible en <http://www.uach.cl/proforma/carbono/manmuesbio.PDF>

Schlegel, B. 2001. Estimación de la biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempreverde. (en línea). Consultado 2 may. 2011. Disponible en: http://www.uach.cl/procarbono/pdf/simposio_carbono/45_schlegel.PDF

Soriano, MD; Pons, V. 2001. Prácticas de edafología y climatología. Valencia, ES. Universidad Politécnica de Valencia. 140p.

Taller de productividad y conservación de los recursos en la agricultura de las laderas, (1995, San Salvador, SV). 1995. Memoria. . Eds. Gustavo Sain, Byron Miranda, Jorge Rivera y Cristina Choto de Cerna. San José, CR. IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura); CIMMYT (Centro Internacional de Mejoramiento Maíz y Trigo). 94p.

Thompson, L.M. & Troeh, F. 1988. Los suelos y su fertilidad. 4 ed. Barcelona, ES. Reverte D.L. 649p.

VIII. Anexos

Anexo 1. Análisis de varianza (ANDEVA) para la biomasa de mantillo (t/ha) en función del estadio de sucesión de bosque y prueba de Diferencia Mínima Significativa (DMS) para un alfa de 0,05; salida de resultados del programa Statistix 9.0.

a. ANOVA

Variación	Suma cuadrados	Grados libertad	Cuadrado Medio	F	Probabilidad
Estadio sucesión	55,24	3	18,41	6,98	0,003
Error	42,23	16	2,64		
Total	97,46	19			

b. Comparación de medias DMS

Estadio de sucesión	Media de B (t/ha) mantillo	Grupos Homogéneos*
5-15 años	5,60	C
15-30 años	5,97	BC
> 30 años	7,93	AB
Primario	9,75	A

*Grupos homogéneos con misma letra implica que medias no difieren estadísticamente

Anexo 2. Análisis de varianza (ANDEVA) para la biomasa de madera muerta (t/ha) en función del estadio de sucesión de bosque y prueba de Diferencia Mínima Significativa (DMS) para un alfa de 0,05; salida de resultados del programa Statistix 9.0.

a. ANOVA

Variación	Suma cuadrados	Grados libertad	Cuadrado Medio	F	Probabilidad
Estadio sucesión	70,50	3	23,50	0,65	0,60
Error	579,48	16	36,22		
Total	649,97	19			

b. Comparación de medias DMS

Estadio de sucesión	Media de B (t/ha) madera muerta	Grupos Homogéneos*
5-15 años	3,42	A
15-30 años	5,84	A
> 30 años	3,26	A
Primario	7,81	A

*Grupos homogéneos con misma letra implica que medias no difieren estadísticamente

Anexo 3. Análisis de varianza (ANDEVA) para el contenido de carbono orgánico en el suelo (COS tC/ha) en función del estadio de sucesión de bosque y prueba de Diferencia Mínima Significativa (DMS) para un alfa de 0,05; salida de resultados del programa Statistix 9.0.

a. ANOVA

Variaciones	Suma cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados Medios	F	Probabilidad
Estadio sucesión	2301,76	3	767,25	1,62	0,23
Error	7587,16	16	474,20		
Total	9888,91	19			

b. Comparación de medias DMS

Estadio de sucesión	Media de COS (tC/ha)	Grupos Homogéneos*
5-15 años	79,85	B
15-30 años	88,01	AB
> 30 años	109,24	A
Primario	92,29	AB

*Grupos homogéneos con misma letra implica que medias no difieren estadísticamente

Anexo 4. Análisis de varianza (ANDEVA) para la densidad aparente del suelo (g/cm^3) en función del estadio de sucesión de bosque y prueba de Diferencia Mínima Significativa (DMS) para un alfa de 0,05; salida de resultados del programa Statistix 9.0.

a. ANOVA

Variaciones	Suma cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados Medios	F	Probabilidad
Estadio sucesión	0,13	3	0,04	2,38	0,11
Error	0,29	16	0,02		
Total	0,43	19			

b. Comparación de medias DMS

Estadio de sucesión	Media de d (g/cm^3)	Grupos Homogéneos*
5-15 años	0,96	AB
15-30 años	1,13	A
> 30 años	1,02	AB
Primario	0,91	B

*Grupos homogéneos con misma letra implica que medias no difieren estadísticamente

Anexo 5. Análisis de varianza (ANDEVA) para el porcentaje de carbono orgánico en el suelo (COS %) en función del estadio de sucesión de bosque y prueba de Diferencia Mínima Significativa (DMS) para un alfa de 0,05; salida de resultados del programa Statistix 9.0.

a. ANOVA

Variaciones	Suma cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados Medios	F	Probabilidad
Estadio sucesión	3,96	3	1,32	1,03	0,41
Error	20,50	16	1,28		
Total	24,46	19			

b. Comparación de medias DMS

Estadio de sucesión	Media de COS (%)	Grupos Homogéneos*
5-15 años	3,04	A
15-30 años	2,74	A
> 30 años	3,95	A
Primario	3,59	A

*Grupos homogéneos con misma letra implica que medias no difieren estadísticamente.

Anexo 6. Prueba de Diferencia Mínima Significativa (DMS) para la biomasa de mantillo en los dos grupos de bosques encontrados (A= bosques de sucesión temprana y B= bosques maduros) para un alfa de 0,05; salida de resultados del programa Statistix 9.0.

a. Comparación de medias DMS

Grupo	Media de biomasa mantillo (t/ha)	Grupos Homogéneos*
A	5,79	B
B	8,84	A

*Grupos homogéneos con misma letra implica que medias no difieren estadísticamente.

Anexo 7. Prueba de Diferencia Mínima Significativa (DMS) para el carbono orgánico en el suelo (COS) en los dos grupos de bosques encontrados (A= bosques de sucesión temprana y B= bosques maduros) para un alfa de 0,05; salida de resultados del programa Statistix 9.0.

Grupo	COS (tC/ha)	Grupos Homogéneos*
A	83,25	A
B	100,76	A

*Grupos homogéneos con misma letra implica que medias no difieren estadísticamente.

Anexo 8. Croquis con la ubicación de las unidades montadas en cada PPM, en cuatro estadios de sucesión de bosques tropicales en la Península de Osa, Puntarenas, Costa Rica, 2011. Los círculos en verde representan las parcelas de mantillo (0,5 cm de radio), las circunferencias en rojo representan las parcelas de madera muerta (5, 65m de radio) y por último las equis representan las áreas donde se tomó la muestra para densidad aparente y carbono en suelo.

