

Combustibles forestales superficiales y riesgo de incendio en dos estadios de sucesión secundaria y bosques primarios en el Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica

Pedro Andrey Rojas-Chaves¹

Braulio Vílchez-Alvarado²

Roger Moya-Roque³

Mahmood Sasa-Marín⁴

Resumen

Se cuantificó el combustible forestal superficial de los árboles en pie y del mantillo orgánico. También, se caracterizó la composición florística, en tres tratamientos de estadios sucesionales, de 10-25 años (29,88 ha) mayor a 30 años (22,75 ha) y bosque primario (38,36 ha). Se estableció un diseño de muestreo de parcelas temporales simple aleatorio estratificado con siete repeticiones por tratamiento (15 x 50 m), con sub muestreo de parcelas de 0,9 m² para la cuantificación del material superficial del suelo. Las muestras de mantillo fueron llevadas al laboratorio del Centro de Investigación en Integración Bosque Industria (CIIBI) del Instituto Tecnológico de Costa Rica en Cartago. Se realizaron pruebas de consumo del combustible. Se determinó el índice de peligrosidad de combustibles superficiales (IPCS). En los tres sitios se identificó un total de 567 individuos,

Abstract

In this study, forest fuel of the standing trees and aboveground mulch was quantified. Also, the floristic composition was characterized in three successional stages of treatment, 10-25 years (29.88 ha), more than 30 years (22.75 ha) and old or primary forest (38.36 ha). The sampling design for temporary plots was a simple random and stratified, with seven replicates per treatment (15 x 50 m), with sub plots 1m² for quantification of surface soil material. Topsoil samples were taken to the laboratory of the Center for Integration Research Forest Industry (CIIBI) at the Instituto Tecnológico de Costa Rica. The consumption tests were performed. The hazard index was determined from surface fuels. A total of 567 individuals, 57 species and 28 families (five families represented by only one individual) was identified. Only 10 species were present in the three successional stages. Most species

1. Consultor forestal

2. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal; Cartago, Costa Rica; bvilchez@itcr.ac.cr

3. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal; Cartago, Costa Rica; rmoya@itcr.ac.cr

4. Organización para Estudios Tropicales msasamarin@gmail.com

distribuidos en 57 especies pertenecientes a 28 familias. Cinco familias fueron representadas por solamente un individuo. Diez especies estuvieron presentes en los tres estadios sucesionales. La mayor cantidad de especies se encontraron en el bosque primario (37), mientras que el bosque mayor a 30 años presentó el mayor número de familias (20). El bosque primario presentó la mayor cantidad de combustible disponible en los árboles con un valor de 254,67 Mg ha⁻¹. Para el bosque secundario maduro (> 30 años) se estimó una biomasa promedio de 196,27 Mg ha⁻¹. Los valores más bajos (71,31 Mg ha⁻¹) correspondieron al bosque de 10-25 años. Los combustibles acumulados en el mantillo fueron mayores para el bosque primario (14,06 Mg ha⁻¹), seguido por el bosque mayor a 30 años (11,87 Mg ha⁻¹), y por último el bosque de 10-25 años (7,75 Mg ha⁻¹). Se encontró que la cantidad de combustibles tiende a ser mayor en los sitios más viejos. Se obtuvo un valor promedio del IPCS de 754,32, según el criterio de clasificación descrito por Galiana (2009) y modificado por Parra (2013), los tres estadios de sucesión se ubicaron en la categoría de peligrosidad media-baja.

Palabras clave: Biomasa, incendios forestales, índice de peligrosidad de combustibles superficiales, Costa Rica.

Introducción

Los incendios forestales son un fenómeno natural y constante en los ecosistemas terrestres. Castillo, Pedernera y Peña (2003); Shlisky et al. (2007) y Mckenzie et al. (2011), señalaron que el fuego ha sido parte vital y esencial en los procesos de sucesión ecológica y dinámica de los paisajes boscosos. En bosques tropicales, los incendios eran poco comunes debido a la elevada humedad, pero en la actualidad son fenómenos bastante frecuentes. Se estima que cerca del 50% de la superficie afectada por el fuego corresponde a áreas tropicales (Goldammer, 1999, Cochrane y Ryan, 2009). Para Schultz et al. (2008) muchos de los incendios son de origen antropogénico y grandes extensiones de bosques, selvas, matorrales y pastizales se consumen año tras año, alterando la dinámica natural del bosque y ocasionando serias repercusiones ambientales (Castillo et al., 2003).

Se conoce desde tiempo atrás que el fenómeno del niño modifica las condiciones climáticas, baja la humedad relativa del aire, sube las temperaturas máximas, promueve el bajo contenido de humedad en la vegetación y la presencia de vientos cálidos que favorecen la formación y expansión de incendios (Castillo et al., 2003; Barlow y Peres, 2004). Asimismo, varios autores (Flannigan, Krawchuk, de Groot, Wotton y Gowman, 2009 y Rodríguez-Trejo, 2012) indican que en la

are found in primary forest (37), while the > 30 years forest had the highest number of families (20). The primary forest has the highest amount of forestry fuel with a value of 254.67 Mg ha⁻¹. The mature secondary forest (> 30 years) was the second highest with 196.27 Mg ha⁻¹. The lowest values (71.31 Mg ha⁻¹) correspond to the 10-25 years forest. The fuels accumulated in the topsoil was higher for primary forest (14.06 Mg ha⁻¹), followed by the largest forest to 30 years (11.87 Mg ha⁻¹), and finally the forest 10-25 years (7.75 Mg ha⁻¹). It was found that the amount of fuel tends to be higher in the older sites. The average value obtained of IPCS was 754.32, according to the classification criteria described by Galiana (2009) and modified by Parra (2013), the three stages of succession are placed in the medium-low risk category.

Keywords: Biomass, forest fire, danger index of surface fuels, Costa Rica.

actualidad, el cambio climático global afecta el régimen del fuego y se observan alteraciones en los incendios forestales en diversas regiones del planeta, que son de mayor duración, intensidad y severidad.

Según Martínez, Vignote, y Caballero (1991) existen múltiples factores ambientales que pueden afectar la dinámica, severidad y propagación de los incendios forestales, tales como, el viento, humedad del ambiente y tipo de combustibles. Otros contribuyentes son, la acumulación de biomasa combinada con condiciones climáticas de sequía extrema, que favorecen considerablemente el riesgo y propagación de los incendios forestales (Baeza y Vallejo, 2008). Además, se conoce que las características estructurales de la vegetación durante un incendio forestal, así como la proporción de combustibles vivos y muertos son también determinantes en los incendios (Baeza, De Luís, Raventós & Escarré, 2002). (Bessie & Johnson, 1995), enfatizaron sobre la influencia que ejerce la carga de combustible en la intensidad y el potencial de propagación de los incendios forestales.

Entre las necesidades de estudiar y prevenir los incendios forestales tropicales están los efectos negativos que producen, porque la combustión de grandes cantidades de biomasa generan emisiones de gases químicamente activos a la atmósfera, tales como dióxido de carbono,

metano, óxido nítrico, entre otros, que contribuyen en gran medida al calentamiento global (Castillo et al., 2003; Morfin-Ríos, Jardel, Alvarado y Michel-Fuentes, 2012).

En relación con la prevención de incendios forestales a partir de las características del bosque, son muchos los esfuerzos que se han hecho para conocer las causas en los ecosistemas templados-fríos (Schultz et al., 2008). Pero falta información sobre las causas e impactos en los diferentes ecosistemas forestales del trópico (Parra, 2013). Dentro de ese concepto, es importante estudiar los procesos de inflamabilidad y consumo de los combustibles de la biomasa que se consume durante un incendio forestal (Neri-Pérez, Rodríguez-Trejo y Contreras-Aguado, 2009).

Por otra parte, en Costa Rica los incendios forestales son cada vez más frecuentes y de mayor intensidad. Según el reporte de la Comisión Nacional sobre Incendios Forestales (CONIFOR, 2013), entre el 2012 y 2013 se registró un aumento de 20 887 hectáreas afectadas por incendios. En el año 2013 esta cifra subió hasta alcanzar 55 603 hectáreas consumidas (incremento de 60%). El 89,50% de los eventos fueron de origen antropogénico y el cambio de uso del suelo es la principal causa (30,25%), quema de pastos (18,25%), quemadas agropecuarias (17,28%) vandalismo (15,43%) y cacería (8,02%).

Sin embargo, aún con el aumento de áreas devastadas por los incendios, la cobertura boscosa se incrementó en un (52,4%) principalmente en las últimas dos décadas (Proyecto Estado de la Nación, 2014), por la predominancia de bosques secundarios y la conservación de algunas áreas con permanencia de bosques viejos (Vílchez, Chazdon y Milla, 2009). Esto marca la importancia del rol y funciones de los bosques secundarios en la protección de fuentes de agua, control de la erosión (Fearnside y Guimaraes, 1996), recuperación de zonas degradadas (Lugo, 1992 y Chazdon, 2003) y refugio y conservación de la diversidad (Duna, 2004 y Lamb, Erskine y Parrotta, 2005).

En el presente estudio se planteó el objetivo general de cuantificar los combustibles superficiales de dos estadios sucesionales del bosque secundario seco tropical transición a húmedo y de un bosque primario de la misma zona de vida. Además, se estudió el riesgo de propagación de incendios de los combustibles presentes en los diferentes bosques estudiados del Parque Nacional Palo Verde.

Material y métodos

Sitio de estudio

El estudio se realizó en el Parque Nacional Palo Verde (PNPV) ubicado en la provincia de Guanacaste (10°21' N, 85° 21' W) (Organization for Tropical Studies (OTS), 2014). El PNPV abarca un área de 19800 hectáreas entre humedales

y bosques en diferentes estadios sucesionales (Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), 2014). El PNPV se encuentra en las zonas de vida bosque seco tropical y bosque húmedo tropical según la clasificación de zonas de vida de Holdridge (1967). Las parcelas se ubicaron específicamente en la zona de vida bosque seco tropical transición a húmedo. La estación seca se extiende por 5 meses, de diciembre a abril, mientras que la estación lluviosa es de 7 meses (mayo – noviembre). La precipitación media anual oscila entre 1267 y 1717 mm, y la temperatura promedio es de 25°C (Gillespie, Grijalva y Farris, 2000). Los suelos más abundantes son Typic Pellusterts/Typic Pelluderts and Typic Ustropepts (Powers, Becknell, Irving y Pérez-Aviles, 2009).

Se identificaron dos estadios sucesionales de bosque: a. de 10-25 años (29,88 ha) b, mayor a 30 años (22,75 ha), y c, viejo o primario (38,36 ha) como grupo de comparación. El bosque juvenil (10-25 años) se ubicó en la parte más baja (7 metros sobre el nivel del mar) y cercana a la laguna Palo Verde; este sitio, fue devastado por un incendio forestal ocurrido en la década de los noventa (CONIFOR, 2013). El bosque secundario mayor de 30 años se definió en un sitio donde se reportan más de 30 años sin incendios y a una altitud intermedia 37 metros sobre el nivel del mar. El bosque primario se ubicó en las partes más altas (110 metros sobre el nivel del mar) Ver figura 1.

Toma de datos / Diseño experimental y muestreo:

Entre agosto y octubre del 2014 se realizaron muestreos de composición florística y carga de combustibles superficiales expresados en megagramos por hectárea ($Mg\ ha^{-1}$). Fueron muestreados los tres diferentes estadios de bosque (de 10-25 años, mayor a 30 años y bosque primario). Para realizar el muestreo primeramente se establecieron parcelas de muestreo temporales. Se utilizó un muestreo simple aleatorio estratificado. En cada estadio se establecieron 7 repeticiones o unidades experimentales ($750\ m^2$). Fueron ubicadas cero grados dirección norte y distribuidas uniformemente en el área de los bosques. En cada unidad experimental se determinó la biomasa en los árboles vivos, además, todo el mantillo orgánico superficial del suelo, ramas y tallos leñosos fue recogido. Las muestras de mantillo fueron llevadas al laboratorio dentro del Centro de Investigación en Integración Bosque Industria (CIIBI) del Instituto Tecnológico de Costa Rica en Cartago. Ahí se realizaron pruebas de inflamabilidad, consumibilidad y combustión para el cálculo del índice de peligrosidad de combustibles superficiales y el riesgo de incendio para cada tipo de bosque.

Carga de combustibles superficiales

Árboles en pie: En cada estadio sucesional se instalaron siete parcelas temporales de $750\ m^2$ (50 m x 15 m) separadas 150 m entre sí de manera que se cubrió toda la superficie del bosque. Se evaluó con intensidades de muestreo de 1,76; 2,31 y 1,37 % para el bosque de 10-15 años, mayor a 30 años y el bosque primario,

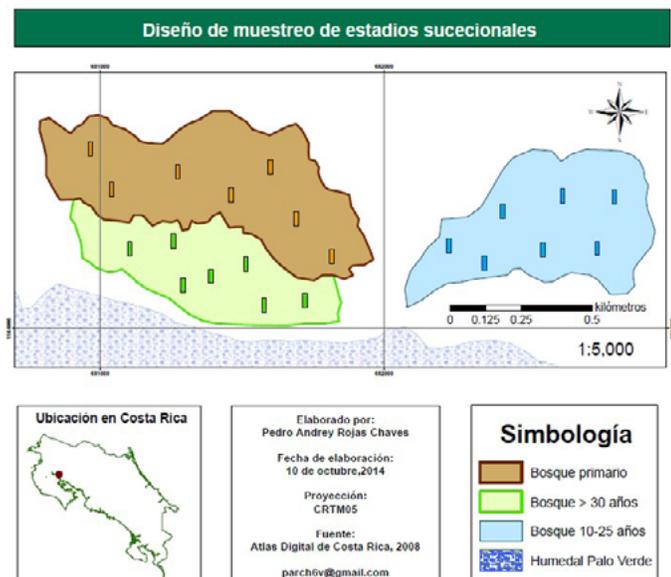


Figura 1. Diseño de muestreo de combustibles en cada estadio sucesional del bosque, del PNPV, Costa Rica.

Figure 1. Sample design of fuel in each successional stage of the forest, of PNPV, Costa Rica.

respectivamente. En cada parcela se identificaron los individuos, se midió el diámetro y altura total de todos los árboles mayores a diez centímetros de diámetro medido a 1,30 metros arriba del suelo, acorde con Powers et al. (2009). La determinación del combustible de los árboles en pie (biomasa de los árboles) se utilizó la ecuación 1 desarrollada por Chaves et al. (2014).

$$AGB_{est} = 0,0673 * (\rho D^2 H)^{0,976}$$

Donde:

AGBest = biomasa de los árboles en pie, kg.

D = diámetro, cm.

H = altura total, m.

ρ = densidad de la madera, g cm⁻³.

El valor de densidad de la madera (Anexo 4) se obtuvo del Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC (2001) y de la base de datos elaborada por Zanne et al. (2009):

Mantillo: Para estimar la cantidad de combustible disponible en la cubierta vegetal superficial del suelo se tomaron tres muestras de 0,9 m² en tres puntos distintos de las parcelas (los dos extremos y centro de la unidad experimental) en los diferentes estadios de sucesión (3 submuestras por unidad experimental).

El material se colectó en bolsas de papel debidamente rotuladas, se llevó al laboratorio de la estación biológica

Palo Verde. El material fue secado a 45°C hasta alcanzar un peso constante (aproximadamente 48 horas), el peso fue medido antes y después del secado. Dichos pesos fueron utilizados para determinar la biomasa (Mg ha⁻¹) mediante la ecuación 2 propuesta por Schleguel, Gayoso y Guerra (2001). Este estudio no incluyó los árboles caídos.

$$Bm = \frac{Phbm}{1 + \left(\frac{CH}{100}\right)}$$

Donde:

Bm = biomasa seca del mantillo, g.

Phbm = peso húmedo del mantillo, g.

CH = contenido de humedad, %.

Índice de peligrosidad de combustibles superficiales

De acuerdo con Galiana, Aranoneses, Montiel, De La Cita y Fernández (2009) el índice de peligrosidad de combustibles superficiales hace referencia a la facilidad intrínseca de un sistema forestal para propagar el fuego, convirtiéndolo en un incendio. Dicho índice se calculó a través de la siguiente ecuación:

$$IP_{CS} = ({}^{\circ}T_{ig}) + ({}^{\circ}T_p) + \%C$$

Donde:

IP_{CS} = Índice de Peligrosidad de Combustibles Superficiales.

CS = Carga de combustibles superficiales.

${}^{\circ}T_{ig}$ = Temperatura de ignición.

${}^{\circ}T_p$ = Temperatura pico o máxima alcanzada.

%C = Porcentaje de consumibilidad.

Para la temperatura de ignición del combustible se utilizó el valor propuesto por Anderson (1970), Neri-Pérez (2009). Dichos autores reportaron que la temperatura de ignición de combustibles promedio es de 300 °C y 324,23 °C respectivamente, para bosques secos tropicales. Para el cálculo del IP_{CS} se utilizó 324,23 °C como la temperatura media de ignición para los tres estadios de sucesión.

Para determinar la proporción de combustible quemado (porcentaje de consumibilidad) se pesó aproximadamente 1 gramo de cada muestra, se colocó en un vidrio reloj y se le aplicó calor con un quemador bunsen hasta que el material se consumió por completo. Luego se retiraron las cenizas y se pesaron. Durante el quemado fue determinada la temperatura máxima mediante el uso de una termocúpla tipo J y adaptada a un data-logger (Marca Testo, modelo 17-T4).

El porcentaje de cenizas (%c) y de consumibilidad (%Co) se calcularon con las ecuaciones 3 y 4 respectivamente, modelos desarrollados por Neri-Pérez et al. (2009):

$$\%c = \frac{pf}{pi} \times 100$$

Donde:

pf = peso de las cenizas

pi = peso inicial de la muestra.

Análisis estadístico

Los datos de abundancia, área basal, volumen y carga de combustibles (cobertura forestal y mantillo) fueron analizados con el programa estadístico Infostat (versión 2008) con un 95% de confianza ($\alpha = 0,05$). Para verificar la normalidad de los datos se realizó la prueba Shapiro-Wilks modificado, ninguno de los valores tuvo un comportamiento normal por lo que se procedió a utilizar estadística no paramétrica para comparar las medianas de las diferentes variables por tratamiento. Se planteó la hipótesis nula (H_0): No existen diferencias significativas entre los combustibles para cada estadio de sucesión y la alternativa (H_a): Si existen diferencias significativas entre los combustibles para cada estadio de sucesión. Se realizó un análisis de varianza no paramétrica (Kruskal-Wallis) para buscar diferencias entre las variables.

Para el índice de peligrosidad de combustibles superficiales se analizó cada una de las variables (temperatura de ignición, temperatura máxima y porcentaje de consumibilidad) mediante una prueba de normalidad de datos (Shapiro-Wilks modificado). Se realizó un análisis de varianza para comprobar si existían diferencias estadísticas significativas entre las variables por estado sucesional. Para comparar las medias de los resultados se utilizó una prueba de Tukey.

Resultados

Estructura y composición florística: Se obtuvo un error de muestreo de 3,68 % sobre el área basal para el diseño simple aleatorio estratificado. En los tres sitios se identificó un total de 567 individuos, distribuidos en 57 especies pertenecientes a 28 familias (5 familias representadas por solamente un individuo). Solamente 10 especies estuvieron presentes en los tres estadios sucesionales (*Alvaradoa amorphoides*, *Astronium graveolens*, *Brosimum alicastrum*, *Caesalpinia eriostachys*, *Calycophyllum candidissimum*, *Guazuma ulmifolia*, *Piscidia cathagenensis*, *Spondias mombin*, *Stemmadenia obovata* y *Sterculia apetala*).

Para el estadio de 10-25 años se registró un total de 216 individuos ($411,43 \text{ ha}^{-1}$), 27 especies pertenecientes a 14 familias (Figura 2, a y b; Anexo 3), donde las cuatro familias con mayor número de individuos abarcan el 82,87% de los árboles (Malvaceae, Simaroubaceae, Fabaceae, Rubiaceae). En el bosque mayor a 30 años, se registraron 179 individuos ($340,95 \text{ ha}^{-1}$) distribuidos en 35 especies, pertenecientes a 21 familias (Figura 2, a y b; Anexo 2). Cuatro de estas familias (Anacardaceae, Malvaceae, Rubiaceae, Burseraceae) abarcaron el 63,69% de los individuos muestreados. En el bosque viejo o primario se encontraron 172 individuos ($327,62 \text{ ha}^{-1}$) pertenecientes a 20 familias y representados por 37 especies (Figura 2, a y b; Anexo 1). El 60,47% de los árboles está representado en tan solo cuatro familias (Fabaceae, Malvaceae, Anacardaceae y Moraceae).

La composición de especies y familias es distinta para cada estadio sucesional, se encontró que existen diferencias significativas ($\alpha = 0,05$; $p = 0.0001$) entre la cantidad de especies y familias. La abundancia de individuos fue mayor en el estadio más temprano (10-25 años) y mostró diferencias estadísticas con respecto a los otros estadios (Cuadro 1). El bosque > 30 años presentó el mayor número de familias (20) (Cuadro 1). La mayor cantidad de especies se encontró en el bosque primario (37). El número de especies presentó forma de J invertida en todos los bosques. El mayor número de especies se encontró en las primeras clases, y disminuyó conforme aumentó el diámetro (Figura 2, c).

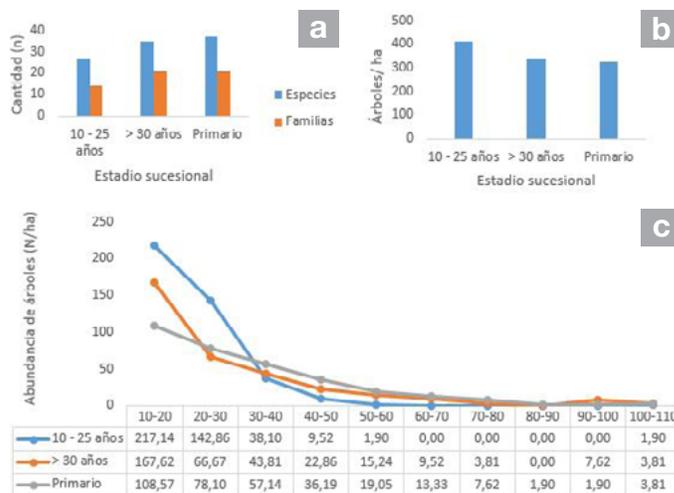


Figura 2. a) Número de especies y familias **b)** abundancia de árboles ($N \text{ ha}^{-1}$) y **c)** número de árboles por hectárea por distribución diamétrica para bosques de diferentes estadios sucesionales del PNPV, Costa Rica. 2014.

Figure 2. a) Number of species and families **b)** abundance of trees ($N \text{ ha}^{-1}$) and **c)** number of trees per hectare per diameter for forests in different successional stages of distribution PNPV, Costa Rica. 2014.

Cuadro 1. Valores promedio con su desviación estándar de los parámetros estructurales (abundancia de individuos por hectárea, número de familias, abundancia de especies, área basal (G) y volumen (V)) para tres estadios sucesionales, en bosques del PNPV, Costa Rica. 2014.

Table 1. Mean values with standard deviation of the structural parameters (abundance of individuals per hectare, number of families, species abundance, basal area (G) and volume (V)) three successional stage, in forests PNPV, Costa Rica. 2014.

Estadio de sucesión	Número de árboles	Desviación estándar	Número de especies	Desviación estándar	Número de familias	Desviación estándar	G (m ² ha ⁻¹)	Desviación estándar	V (m ³ ha ⁻¹)	Desviación estándar
10 - 25 años	216 a	9,04	27 a	17,64	14 a	24,65	16,78 a	0,12	81,09 a	0,91
> 30 años	179 b	7,64	35 b	7,22	20 b	13,88	30,12 b	0,28	215,07 b	2,53
Primario	172 b	7,44	37 b	3,67	19 b	10,09	34,49 c	0,26	262,58 c	2,24

* Valores con la misma letra son estadísticamente iguales.

* Values with the same letter are statistically equal

Cuadro 2. Combustible (Mg ha⁻¹), desviación estándar y coeficiente de variación para los árboles en pie y el mantillo en tres estadios de sucesión, en bosques del PNPV, Costa Rica 2014.

Table 2. Fuel (Mg ha⁻¹), standard deviation and coefficient of variation for standing trees and mulch in three stages of succession, PNPV forests, Costa Rica 2014.

Estadio sucesional	Combustible árboles en pie (Mg ha ⁻¹)	Desviación estándar	Coeficiente de variación	Combustible mantillo (Mg ha ⁻¹)	Desviación estándar	Coeficiente de variación	Combustible total (Mg ha ⁻¹)
10 - 25 años	71,31 a	0,65	197,97	7,75 a	3,00	38,75	79,06 a
> 30 años	196,27 b	2,13	194,40	11,87 b	5,78	48,67	208,14 b
Primario	254,67 c	2,39	161,61	14,06 b	10,24	72,84	268,73 c
Promedio	174,08	1,72	184,66	11,23	6,34	53,42	185,31

* Valores con la misma letra son estadísticamente iguales.

* Values with the same letter are statistically equal.

Se encontró que la densidad de árboles por unidad de área disminuye conforme aumenta la edad de los sitios (Cuadro 1 y Figura 2, c). En cuanto al área basal y volumen encontramos que los valores promedio tienden a ser mayores conforme se aumenta el estadio sucesional, se encontraron diferencias estadísticas significativas ($\alpha = 0,05$; $p = 0,0001$) entre las medias de los tratamientos (Cuadro 1). El cuadro 1 presenta los valores de los parámetros estructurales (abundancia de individuos, familias y especies, área basal (G) y volumen (V)) para los diferentes estadios de sucesión).

El bosque primario tuvo la mayor área basal y en la categoría entre 30 y 40 cm de diámetro (Figura 3). El valor más alto de área basal reportado se encuentra en el bosque más juvenil (10 – 25 años) en la clase diamétrica entre 20 y 30 cm (Figura 3), que a su vez, es la segunda categoría que presenta mayor densidad de individuos (Figura 2, c).

Carga de combustibles superficiales

El valor más alto de combustible promedio de los árboles en pie se encontró en la categoría diamétrica 60 - 70 cm (bosque primario) con 47,11 Mg ha⁻¹ y el valor mínimo de biomasa correspondió a la clase de 50 – 60 cm del

estadio 15 – 25 años con apenas 0,93 Mg ha⁻¹ (Figura 4). Este resultado fue consecuente con el valor de área basal más bajo del estudio (0,40 m² ha⁻¹), mientras que el pico más alto de combustibles corresponde al quinto valor más alto del área basal (4,27 m² ha⁻¹).

Se encontraron diferencias estadísticas ($\alpha = 0,05$; $p = 0,0001$) entre las tres edades de bosque, para la carga de combustibles y la biomasa acumulada por los árboles en pie. Los valores más bajos de combustible (71,31 Mg ha⁻¹) correspondieron al bosque de 10-25 años. Para el bosque secundario maduro (> 30 años) se estimó una biomasa promedio de 196,27 Mg ha⁻¹. El bosque primario presentó la mayor cantidad de combustible disponible con un valor de 254,67 Mg ha⁻¹ (Cuadro 2). Además en ese mismo cuadro, se presentan los valores obtenidos de combustibles (Mg ha⁻¹) en los árboles en pie y el mantillo orgánico para los diferentes estados de sucesión. De las 5 especies con mayor densidad de madera se encontraron 3 en el mayor a 30 años, 4 en el bosque primario y ninguna en el estadio más joven. La cantidad de biomasa fue mayor conforme aumentó la edad del sitio, hubo diferencias significativas entre los tres sitios de estudio ($\alpha = 0,05$) para ambos combustibles (árboles en pie y mantillo).

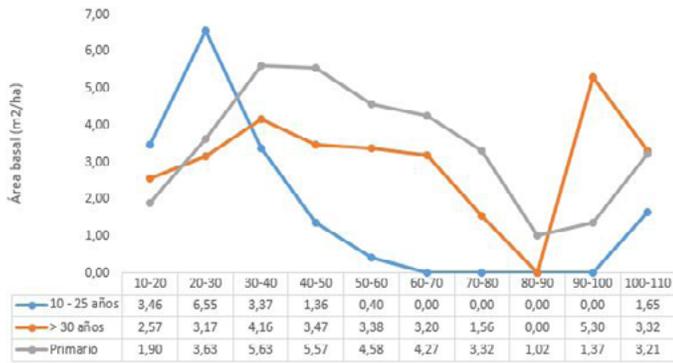


Figura 3. Área basal ($m^2 ha^{-1}$) según la distribución diamétrica para bosques de diferentes estadios sucesionales del PNPV, Costa Rica 2014.

Figure 3. Basal area ($m^2 ha^{-1}$) as the diameter distribution for forests of different successional stages of PNPV, Costa Rica 2014.

Los combustibles acumulados en el mantillo fueron menores en el bosque de 10-25 años ($7,75 Mg ha^{-1}$) seguido por el bosque mayor a 30 años ($11,87 Mg ha^{-1}$), y por último los mayores valores fueron para el bosque primario ($14,06 Mg ha^{-1}$), (Cuadro 2). Se encontraron diferencias estadísticas ($\alpha = 0,05$; $p = 0,0018$) en la cantidad de biomasa del mantillo orgánico en los tres sitios muestreados. Al calcular los valores promedio para cada una de las parcelas, se encontró que el valor mínimo de biomasa correspondió al de la parcela BJ7 (bosque de 10-25 años) con $5,25 Mg ha^{-1}$ y el máximo alcanzado correspondió a la parcela BP6 (bosque primario) con $33,66 Mg ha^{-1}$.

Se obtuvo un valor total de combustible forestal de $79,06 Mg ha^{-1}$ para el bosque más joven (10 – 25 años), $208,14 Mg ha^{-1}$ en el bosque mayor a 30 años y un máximo de $268,73 Mg ha^{-1}$ en el bosque primario (Figura 5) con la mayor carga de combustibles disponible. ($\alpha = 0,05$; $p = 0,0001$).

Índice de peligrosidad de combustibles superficiales

Temperatura de ignición ($^{\circ}T_{ig}$)

Para el cálculo del IPCS se utilizó $324,23 ^{\circ}C$ como la temperatura media de ignición para los tres tipos de bosque.

Temperatura pico o máxima alcanzada ($^{\circ}T_p$)

El valor promedio de temperatura pico obtenido fue de $347,90 ^{\circ}C$. Se determinó que no existen diferencias estadísticas ($\alpha = 0,05$; $p = 0,0806$) entre los tratamientos.

Porcentaje de consumibilidad (%C)

No se encontraron diferencias estadísticas ($\alpha = 0,05$; $p = 0,0704$) entre la proporción de consumo del combustible en los tres tipos de bosque.

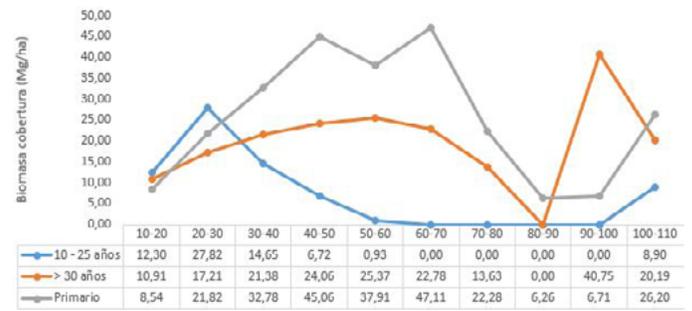


Figura 4. Carga de combustibles de árboles en pie ($Mg ha^{-1}$) según la distribución diamétrica para bosques de diferentes estadios sucesionales del PNPV, Costa Rica. 2014.

Figure 4. Load fuels standing trees ($Mg ha^{-1}$) as the diameter distribution for forests of different successional stages of PNPV, Costa Rica. 2014.

El valor promedio más alto correspondió al bosque de 10 – 25 años ($84,26 \%$) (Cuadro 3). Por otro lado, el bosque primario presentó el menor ($78,63 \%$). Los porcentajes de consumo fueron desde el 50% hasta un 100 % (Figura 6).

Se obtuvo un valor promedio del IPCS de $754,32$, según el criterio de clasificación descrito por Galiana (2009) y modificado por Parra (2013). Los tres estadios de sucesión se ubicaron en la categoría de peligrosidad de propagación del fuego de media-baja, resultados similares al obtenido por Parra (2013).

Discusión

Estructura y composición florística

Fonseca, Chaves, Mora y Meza (2002) tienen registros de 34 familias y 68 especies en bosques secos de Guanacaste, valores cercanos a los obtenidos en nuestro trabajo de 28 familias y 57 especies. Además, Zamora (2010) obtuvo resultados de abundancia de familias y especies aproximados a los del presente estudio (32 y 69 respectivamente) en una evaluación de la composición florística en bosques secos en Miramar de Puntarenas. La abundancia y diversidad en los distintos estadios sucesionales pueden explicarse de acuerdo a lo encontrado por Morales-Salazar, Vílchez-Alvarado, Chazdon, Ortega-Gutiérrez, Ortiz-Malavassi y Guevara-Bonilla (2012), que mencionan que los bosques primarios son más diversos que los bosques secundarios y que los índices de Shannon-Wiener y Simpson, así como el Alpha de Fisher incrementa en diversidad conforme se aumenta el estadio de sucesión del bosque.

La tendencia de la densidad de árboles por unidad de área a disminuir conforme aumenta la edad de los sitios también fue descrita por Powers et al. (2009) en bosques secos de Guanacaste, y por Vílchez, et al. (2009) en

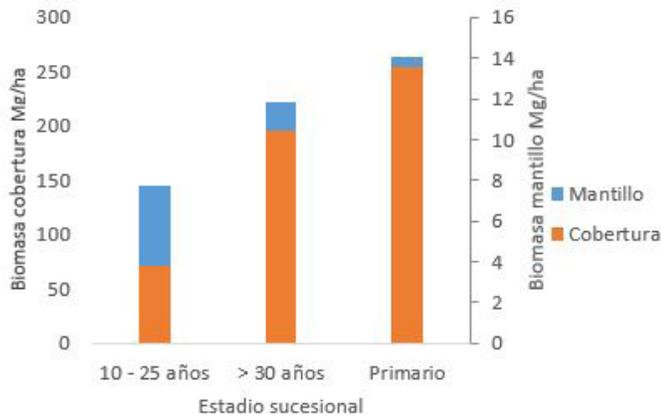


Figura 5. Carga de combustibles de árboles en pie y mantillo orgánico ($Mg\ ha^{-1}$) para tres bosques de diferentes estadios sucesionales del PNPV, Costa Rica. 2014.

Figure 5. Load fuels standing trees and organic mulch ($Mg\ ha^{-1}$) for three forests in different successional stages of PNPV, Costa Rica. 2014.

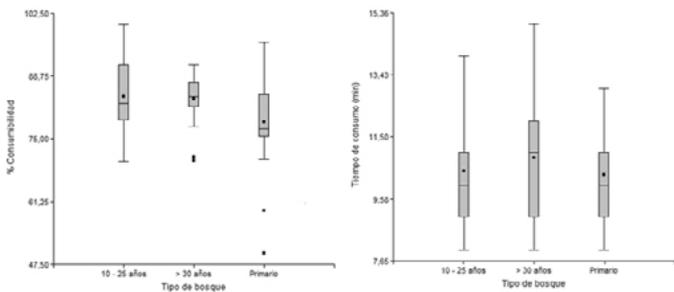


Figura 6. Porcentaje y tiempo de consumo del combustible presente en el mantillo superficial en tres bosques de diferentes estadios sucesionales del PNPV, Costa Rica. 2014.

Figure 6. Percentage and time consumption of fuel in the forests surface mulch in three different successional stages of PNPV, Costa Rica. 2014.

bosques secundarios de la región Huetar Norte de Costa Rica. El comportamiento del área basal y el volumen aumenta según se incrementa la edad de los bosques fue descrita por Leiva, Rocha, Mata y Gutiérrez-Soto (2009), quienes comprobaron este comportamiento con una correlación ($r^2 = 0,96$) en trabajos realizados en el Parque Nacional Santa Rosa, Costa Rica, en bosque seco tropical y bosque húmedo tropical transición a basal, en una secuencia de seis edades aproximadas de sucesión (10, 15, 20, 40, 60 y > 100). Carvajal-Venegas y Calvo-Alvarado (2013) definen este comportamiento de incremento del área basal y volumen como una muestra del estado de recuperación de los bosques.

En el bosque primario, el pico máximo de área basal ocurrió en la categoría entre 30 y 40 cm de diámetro (Figura 3). En esa clase diamétrica (30 – 40 cm) se presenta menor cantidad de individuos que en las dos

clases anteriores, pero con diámetros mayores. En las clases posteriores, de 40 – 50 hasta 80 – 90 cm se presentó una disminución del área basal con un aumento en las últimas dos categorías diamétricas las cuales corresponden a los diámetros más grandes, comportamiento también presente para el bosque de mayor de 30 años y el de 10-25 años. Morales-Salazar et al. (2012), Zamora (2010) y Louman, Quirós y Nilsson (2001) encontraron patrones de distribución de área basal y volumen por clase diamétrica ($dap > 10\ cm$) similares a los del presente estudio.

Carga de combustibles superficiales

Los valores obtenidos (Cuadro 2) concuerdan con lo encontrado por Becknell, Kucek y Powers (2012) para sitios bajo condiciones ambientales y ecológicas similares en Costa Rica, con un valor máximo de biomasa reportado de $334\ Mg\ ha^{-1}$. Por su parte, Gasparri y Manghi (2004) obtuvieron un valor cercano ($266\ Mg\ ha^{-1}$) al del bosque primario en estudios de los bosques subtropicales de Argentina. Se encontró que la cantidad de biomasa acumulada en los árboles tiende a ser mayor en los sitios más viejos. Becknell et al. (2012) reportan el mismo comportamiento en bosque seco y seco transición húmedo en la provincia de Guanacaste. Por su parte, Ulate (2011) obtuvo valores promedio de biomasa para la zona de vida bosque seco tropical (bs-T) de 79,58, 129,59 y 161,33 $Mg\ ha^{-1}$ en bosques secundarios tardíos (> 20 años), intervenidos y primarios, respectivamente; observándose la misma relación entre la edad del bosque y la cantidad de biomasa. Los resultados obtenidos de biomasa en el bosque primario están por encima del promedio encontrado por Ulate (2011), sin embargo el valor se encuentra dentro del ámbito de distribución normal descrito por Becknell et al. (2012). Para estudios posteriores se recomienda considerar la biomasa que aportan los árboles caídos ya que constituyen una parte importante de los combustibles, sin embargo, la determinación de estos valores va a depender del estado de descomposición de la madera.

La tendencia del aumento de la cantidad de combustibles del mantillo con la edad del bosque (Figura 5), es un comportamiento también descrito por Aguilar-Arias, Ortiz-Malavassi, Vilchez-Alvarado y Chazdon (2011), quienes obtuvieron a su vez, valores de biomasa ligeramente inferiores, en bosques de la Península de Osa. Esta diferencia puede deberse a que ambos estudios se realizaron en distintas zonas de vida. Además, según Xuluc-Tolosa, Vester, Ramírez-Marcial, Castellanos-Albores y Lawrence (2003), los bosques secos caducifolios tienden a acumular mayor cantidad de hojarasca, debido a que muchos de los individuos pierden completa o parcialmente su follaje en períodos secos, además de presentarse una baja tasa de descomposición de materia orgánica.

Cuadro 3. Porcentaje y tiempo de consumibilidad con la respectiva desviación estándar, coeficiente de variación y error estándar de las medias, para el mantillo superficial del suelo en tres estadios de sucesión, en bosques del PNPV, Costa Rica 2014.

Table 3. Percentage and consumability time with the respective standard deviation, coefficient of variation and standard error of the mean, for surface soil mulch in three stages of succession, PNPV forests, Costa Rica 2014.

Estadio de sucesión	Porcentaje de consumibilidad	Desviación estándar	Coeficiente de variación	Error estándar	Tiempo de consumo (min)	Desviación estándar	Coeficiente de variación	Error estándar
10 - 25 años	84,26 a	8,79	10,43	1,92	10,43 a	1,50	14,39	0,33
> 30 años	83,67 a	5,83	6,97	1,27	10,86 a	1,77	16,28	0,39
Primario	78,63 a	10,31	13,11	2,25	10,34 a	1,56	15,09	0,34
Promedio	82,19	8,31	10,17	1,81	10,54	1,61	15,25	0,35

* Valores con la misma letra son estadísticamente iguales.

* Values with the same letter are statistically equal.

Cuadro 4. Índice de peligrosidad de combustibles superficiales (IPCS) en tres estadios de sucesión en bosques del PNPV, Costa Rica. 2014.

Table 4. Index danger of surface fuels (IPCS) in three stages of forest succession PNPV, Costa Rica. 2014.

Estadio de sucesión	Carga de combustibles (Mg ha ⁻¹)	Temperatura ignición (°C)	Temperatura máxima (°C)	Consumibilidad (%)	IPcs
10 - 25 años	7,75	324,23	349,70	84,26	758,19
> 30 años	11,87	324,23	344,10	83,67	752,00
Primario	14,06	324,23	349,90	78,63	752,76
Promedio	11,23	324,23	347,90	82,19	754,32

Los valores totales de carga de combustibles siguen la misma tendencia de aumento conforme se incrementa la edad del bosque (Cuadro 2). Distintos autores encontraron que los bosques más viejos además de ser más diversos, presentan mayor cantidad de individuos de gran tamaño (Morales-Salazar et al., 2012), además, las especies de los bosques más longevos presentan valores de densidad de la madera superiores a los más juveniles por lo que la biomasa acumulada en los individuos de estas especies es mayor.

Índice de peligrosidad de combustibles superficiales

Temperatura de ignición: Anderson (1970) y Parra (2013) reportaron valores de temperatura de ignición de combustibles promedio de 300 °C y 324,23 °C respectivamente para bosques secos tropicales. Al utilizar un valor de referencia existe un cierto grado de incertidumbre, ya que el material con el que se hicieron las pruebas es distinto al del estudio. Para estudios posteriores se recomienda contar con el equipo y tecnología necesaria para determinar la temperatura de ignición de los combustibles.

Temperatura pico o máxima alcanzada (°T_p): El resultado promedio en el estudio es comparable con el reportado por Parra (2013) en bosques de Colombia bajo

condiciones ambientales similares (344,20 °C). En ambos estudios se utilizaron bosques de diferentes edades.

Porcentaje de consumibilidad (%C): Parra (2013) reportó porcentajes de consumo inferiores a los del estudio (Figura 6), para el bosque más avanzado señaló un consumo de 63,70 % y de 77,30 % para el bosque secundario intermedio. Neri-Pérez et al. (2009) encontró que la hojarasca de los bosques subcaducifolios y caducifolios tienden a consumirse en mayor medida que los bosques perennifolios. De igual manera, Mutch (1970) describe valores de consumo más altos para los bosques latifoliados tropicales, en contraste con ecosistemas pertenecientes a otros pisos altitudinales según Holdridge (1967). Por otro lado, Neri-Pérez et al. (2009) también encontraron que los bosques más avanzados en edad presentan porcentajes de consumo inferiores a los bosques de menor edad.

Los tres estadios de sucesión se ubicaron en la categoría de peligrosidad de propagación del fuego de media-baja. Esto se debe a que los valores de temperatura de ignición y máxima son relativamente altos por lo que el material presenta cierto tiempo de retardo de combustión. Sin embargo, bajo condiciones naturales el bosque puede verse afectado por otros factores como la radiación, humedad del suelo, velocidad del viento y topografía del

terreno que podrían favorecer la propagación del fuego. Es recomendable realizar estudios calorimétricos de las especies dominantes en cada sitio de estudio, ya que al ser bosques compuestos por una gran diversidad de especies, es común que la dinámica de propagación del fuego sea condicionada por el material preponderante.

Los resultados mostraron que la abundancia, composición de especies, área basal y volumen del bosque aumentan conforme avanza el estadio de sucesión. Además existen diferencias en el grado de acumulación de combustibles forestales según el estadio sucesional del bosque. A medida que este avanza aumentan las cantidades de combustibles. En el bosque primario se encuentra la mayor concentración de combustibles tanto de los árboles en pie como del mantillo superficial del suelo. La biomasa representada en los árboles en pie constituye el principal aporte de combustibles en el bosque, por lo tanto, existe una gran acumulación de material leñoso disponible para arder en presencia de los incendios forestales. Como conclusiones se puede afirmar que el valor promedio de temperatura máxima alcanzada por los combustibles es de 347,90 °C para todo el bosque. La proporción de combustible que se consume está por encima del 75 % para los tres estadios sucesionales muestreados. Por último, el riesgo de ocurrencia de incendios según la peligrosidad es de media-baja en los tres estadios de sucesión.

Agradecimientos

A la Organización para Estudios Tropicales por brindarme todas las facilidades dentro de las instalaciones de la estación Biológica Palo Verde y muy especialmente al personal de la estación por su calidez y trato durante la estadía en la elaboración del proyecto.

Referencias

- Aguilar-Arias, H., Ortiz-Malavassi, E., Vilchez-Alvarado, B., y Chazdon, R.L. (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. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 9 (22), 22-31. Recuperado de <http://www.tec-digital.itcr.ac.cr/servicios/ojs/index.php/kuru/article/view/360>
- Anderson, H. E. (1970). Forest fuel ignitibility. *Fire Technology*, 6 (4), 312-322. Recuperado de <http://link.springer.com/article/10.1007/BF02588932>
- Atlas Digital de Costa Rica. (2008). Edgar Ortiz Malavassi y Casia Soto Montoya. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Baeza, M. J., De Luís, M., Raventós, J. y Escarré, A. (2002). Factors influencing fire behaviour in shrublands of different stand ages and the implications for using prescribed burning to reduce wildfire risk. *Journal of Environmental Management*, 65, 199-208. Recuperado de <http://www.ua.es/personal/jraventos/pdfs/14%20JEM%202002.pdf>
- Baeza, M. J. y Vallejo, V. R. (2008). Vegetation recovery after fuel management in Mediterranean shrublands. *Applied Vegetation Science*, 11 (2), 151-158.
- Barlow, J., y Peres, C. A. (2004). Ecological responses to El Niño-induced surface fires in Central Brazilian Amazonia: management implications for flammable tropical forests. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, 359 (1443), 367-380.
- Becknell, J. M., Kucek, L. K. y Powers, J. S. (2012). Aboveground biomass in mature and secondary seasonally dry tropical forests: A literature review and global synthesis. *Forest Ecology and Management*, 276 (2012), 88-95. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112712002009>
- Bessie, W.C. y Johnson, E.A. (1995). The relative importance of fuels and weather on fire behavior in subalpine forests. *Ecology*, 76 (3), 747-762. Recuperado de <http://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1091&context=barkbeetles>
- Carvajal-Venegas, D. y Calvo-Alvarado, J. C. (2013). Tasas de crecimiento, mortalidad y reclutamiento de vegetación en tres estadios sucesionales del bosque seco tropical, Parque Nacional Santa Rosa, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 10(25), 1-12. Recuperado de <http://www.tec-digital.itcr.ac.cr/servicios/ojs/index.php/kuru/article/view/1371/1267>
- Castillo, M., Pedernera, P. y Peña, E. (2003). Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global. *Revista ambiente y desarrollo de CIPMA*, 19 (3-4), 44-53. Recuperado de http://www.cipma.cl/web/200.75.6.169/RAD/2003/3-4_Castillo.pdf
- Chaves, J., Rejou-Mechain, M., Burquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, F. M., Goodman, R. C., Henry, M., Martinez - Yrizar, A., Mugasha, W. A., Muller -Landau, H. C., Mencuccini, M., Nelson, B.W., Ngomanda, A., Nogueira, E.M., Ortiz-Malavassi, E., Pelissier, R., Ploton, P., Ryan, C.M., Saldarriaga, J. G. y Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*. doi: 10.1111/gcb.12629
- Chazdon, R.L. (2003). Tropical forest recovery: legacies of human impact and natural disturbances. *Perspectives in Plant Ecology Evolution and Systematics*, 6, 51-71.
- Cochrane, M.A. & Ryan, K.C. (2009). *Fire and fire ecology: Concepts and principles*. Alemania: Cochrane. Recuperado de http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-77381-8_2
- Comisión Nacional sobre Incendios Forestales (CONIFOR). (2013). *Resultados de la temporada de incendios forestales 2013*. (Comunicado de prensa). San José: Secretaría ejecutiva.
- Duna, RR. (2004). Recovery of faunal communities during tropical forest regeneration. *Conservation Biology*, 18(2), 302-309. Recuperado de http://www.globalrestorationnetwork.org/uploads/files/LiteratureAttachments/237_recovery-of-faunal-communities-during-tropical-forest-regeneration.pdf

- Fearnside, P.M y Guimaraes, W.B. (1996). Carbon uptake by secondary forests in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management*, 80 (1-3), 35-46.
- Flannigan, M.D., Krawchuk, M.A., de Groot, W.J., Wotton, B.M., Gowman, L.M. (2009). Implications of changing climate for global wildland fire. *International journal of wildland fire*, 18 (5), 483-507. Recuperado de <http://www.publish.csiro.au/?paper=WF08187>
- Fonseca, W., Chaves, E., Mora, F., Meza, V. (2002). Dinámica y composición del bosque seco tropical. Seminario sobre Ecosistemas Forestales de Bosques Secos Mesoamericanos. Heredia: Universidad Nacional, Instituto de Investigación y Servicios Forestales. 154-160.
- Galiana, M., Aranoneses, C., Montiel, C., De La Cita, L. y Fernández, M. (2009). *Caracterización de los escenarios del fuego en España*. (5° Congreso Forestal Español). Ávila: S.E.C.F. – Junta de Castilla y León. Recuperado de <http://www.congresoforestal.es/fichero.php?t=12225&i=14&m=2185>
- Gasparri, I. y Manghi, E. (2004). *Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono de las regiones forestales argentinas*. (Informe Final). Argentina: Secretaria de ambiente y desarrollo sustentable, Dirección de bosques. Recuperado de http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/umsef/file/volumen_biomasa_carbono.pdf
- Gillespie, T.W., Grijalva, A. y Farris, C.N. (2000). Diversity, composition, and structure of tropical dry forests in Central America. *Plant Ecology*, 147, 37-47.
- Goldammer, J.G. (1999). Forests on fire. *Science*, 284 (5421), 1782-1783. Recuperado de <http://www.sciencemag.org/content/284/5421/1782.1.full>
- Holdridge, L.R. (1967). Life zone ecology. San José, CR, Tropical Science Center. p. 40-43.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2001). *Climate change 2001: The scientific Basis*. (Technical Sumamary. Contribution of working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change). Cambridge: WMO-UNEP. Cambridge University Press. Recuperado de <http://www.ipcc.ch/home>
- Lamb, D., Erskine, P.D y Parrotta, J.A. (2005). Restoration of degraded tropical forest landscapes. *Science*, 310 (5754), 1628-1632.
- Leiva, J. A., Rocha, O. J., Mata, R. y Gutiérrez-Soto, M. V. (2009). Cronología de la regeneración del bosque tropical seco en Santa Rosa, Guanacaste, Costa Rica. II. La vegetación en relación con el suelo. *Revista Biología Tropical*, 57 (3), 817-836. Recuperado de <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/rbt/article/viewFile/5495/5241>
- Louman, B., Quirós, D. y Nilsson, M. (2001). *Silvicultura de bosques latifoliados húmedos con énfasis en América Central*. Turrialba, C.R.: CATIE.
- Lugo, A.E. (1992). Comparison of tropical tree plantations and with secondary forests of similar age. *Ecological Monographs*, 62 (1), 1-41.
- Martinez, M. S., Vignote, J. M., Caballero, D. (1991). CARDIN, un sistema para la simulación de la propagación de incendios forestales. *Forest systems*, 0 (1), 121-133. Recuperado de <http://recyt.fecyt.es/index.php/IA/article/view/4672/3996>
- Mckenzie, D., Miller, C. y Falk, D.A. (2011). *The landscape ecology of fire*. New York, USA: Spronger Science+Media B.V. Recuperado de http://www.firescience.gov/projects/09-2-01-10/project/09-2-01-10_09_2_01_10_Deliverable_02.pdf
- Morales-Salazar, m., Vilchez-Alvarado, B., Chazdon, R. L., Ortega-Gutiérrez, M., Ortiz-Malavassi, E. y Guevara-Bonilla, M. (2012). Diversidad y estructura horizontal en los bosques tropicales del Corredor Biológico de Osa, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 9 (23), 19-28. Recuperado de [http://www.tec.ac.cr/sitios/Docencia/forestal/kuru/Documents/2012/Vol-9\(23\)-2012/2.%20Diversidad%20y%20estructura%20horizontal%20en%20los%20bosques%20tropicales%20del%20Corredor%20Bio%20C3%B3gico%20de%20Osa,%20Costa%20Rica.pdf](http://www.tec.ac.cr/sitios/Docencia/forestal/kuru/Documents/2012/Vol-9(23)-2012/2.%20Diversidad%20y%20estructura%20horizontal%20en%20los%20bosques%20tropicales%20del%20Corredor%20Bio%20C3%B3gico%20de%20Osa,%20Costa%20Rica.pdf)
- Morfin-Ríos, J.E., Jardel P., Alvarado C. y Michel-Fuentes, J. M. (2012). *Caracterización y cuantificación de combustibles forestales*, Comisión Nacional Forestal-Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco, México: Editorial Universitaria José Bonifacio Andrada. Recuperado de http://queimadas.cptec.inpe.br/~rqueimadas/material3os/Evaluac_cuantific_de_combustibles_Forestales.pdf
- Mutch, R.W. (1970). Wildland fires and ecosystems - a hypothesis. *Ecology* 51(6), 1046-1051. Recuperado de http://www.nps.gov/seki/naturescience/fic_f_conif.htm
- Neri-Pérez, A.C., Rodríguez-Trejo, D.A. y Contreras-Aguado, R. (2009). Inflamabilidad de combustibles forestales en las selvas de Calakmul, Campeche. *Universidad y ciencia*, 25 (2), 121-132. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792009000200002
- Organization for Tropical Studies. (2014). Estación biológica Palo Verde. Recuperado de http://www.ots.ac.cr/index.php?option=com_content&task=view&id=238&Itemid=415
- Parra, A. C. (2013). *Propuesta de un índice de riesgo local de incendios superficiales de cobertura vegetal, caso: cuenca media del río Cali, Colombia*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional, Heredia, CR.
- Powers, J. S., Becknell, J. M., Irving, J. y Pérez-Aviles, D. (2009). Diversity and structure of regenerating tropical dry forests in Costa Rica: Geographic patterns and environmental drivers. *Forest Ecology and Management*, 258 (2009), 959-970. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112708008165>
- Proyecto Estado de la Nación. (2014). *Armonía con la naturaleza*. (Vigésimo informe). San José, CR. Recuperado de <http://www.estadonacion.or.cr/20/#informe>
- Rodríguez-Trejo, D.A. (2012). Génesis de los incendios forestales. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 357-373.
- Schleguel, B., Gayoso, J. y Guerra, J. (2001). *Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial: Manual de procedimientos para inventarios de carbono en ecosistemas forestales*, Universidad Austral de Chile. Valdivia. Recuperado de <http://www.uach.cl/proforma/carbono/manincar.pdf>

- Schultz, M.G., Heil, A., Hoelzemann, J.J., Spessa, A., Thonicke, K., Goldammer, J.G., Held, A.C., Pereira, J.M., van het Bolscher, M. (2008). Global wildland fire emissions from 1960 to 2000. *Global Biogeochemical Cycles*, 22, 1-17. Recuperado de <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2007GB003031/full>
- Shlisky, A., Waugh, J., González, P., González, M., Manta, M., Santoso, H., Fulks, W. (2007). *Fire ecosystems and people: Threats and strategies for global biodiversity conservation*. (GFI Technical Report 2007-2). Arlington, VA.
- Sistema Nacional de Áreas de Conservación. (2014). Área de Conservación Arenal Tempisque, Parque Nacional Palo Verde. Recuperado de <http://www.sinac.go.cr/AC/ACAT/PNPaloVerde/Paginas/default.aspx>
- Vílchez, B., Chazdon, R. y 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 pp.
- Ulate, C. A. (2011). *Análisis y comparación de la biomasa aérea de la cobertura forestal según zona de vida y tipo de bosque para Costa Rica*. (Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica). Recuperado de http://bibliodigital.itcr.ac.cr/xmlui/bitstream/handle/2238/3005/Informe_final.pdf?sequence=1
- Xuluc-Tolosa, F.J., Vester, H.F.M., Ramírez-Marcial, N., Castellanos-Albores, J. y Lawrence, D. (2003). Leaf litter decomposition of tree species in three successional phases of tropical dry secondary forest in Campeche, Mexico. *Forest Ecology and Management*, 174, 401-412.
- Zamora, M. (2010). *Caracterización de la flora y estructura de un bosque transicional húmedo a seco, Miramar, Puntarenas, Costa Rica*. (Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica). Recuperado de http://bibliodigital.itcr.ac.cr/xmlui/bitstream/handle/2238/3017/Informe_
- Zanne, A. E., Lopez-Gonzalez, G., Coomes, D. A., Ilic, J., Jansen, S., Lewis, S. L., Miller, R. B., Swenson, N. G., Wiemann, M. C., and Chave, J. (2009). Global wood density database. Dryad. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10255/dryad,235>

Anexos

Anexo1. Número de árboles, área basal, volumen y biomasa de las especies presentes en el bosque primario del PNPV, Costa Rica. 2014.

Especie	Familia	Número de individuos	Área basal (m ² ha ⁻¹)	Volumen (m ³ ha ⁻¹)	Biomasa (Mg ha ⁻¹)
<i>Allophylus occidentalis</i>	Sapindaceae	1	0,0437	0,1831	0,1002
<i>Alvaradoa amorphoides</i>	Simaroubaceae	4	0,7824	6,2575	5,4700
<i>Astronium graveolens</i>	Anacardaceae	12	1,8757	14,1636	17,5453
<i>Bombacopsis quinata</i>	Malvaceae	4	2,1021	15,7668	11,2375
<i>Brosimum alicastrum</i>	Moraceae	17	5,2987	44,3338	46,1473
<i>Bursera glabra</i>	Burseraceae	1	0,2740	1,8806	0,8769
<i>Bursera simaruba</i>	Burseraceae	7	0,8109	4,7760	2,4885
<i>Caesalpinia eriostachys</i>	Fabaceae	6	0,9401	7,3627	8,3225
<i>Calycophyllum candidissimum</i>	Rubiaceae	8	1,8399	14,2476	14,7610
<i>Cordia panamensis</i>	Cordiaceae	2	0,0994	0,5171	0,3147
<i>Croton sp.</i>	Euphorbiaceae	1	0,0223	0,0450	0,0300
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	Fabaceae	2	1,2784	12,1404	6,8560
<i>Guaiacum sanctum</i>	Zygophyllaceae	1	0,3533	2,2235	3,8764
<i>Guazuma ulmifolia</i>	Malvaceae	10	0,7965	3,8902	3,1969
<i>Hura crepitans</i>	Euphorbiaceae	2	2,9237	23,1786	13,9840
<i>Licania arborea</i>	Chrysobalanaceae	1	0,1541	0,9541	0,8978
<i>Lonchocarpus minimiflorus</i>	Fabaceae	6	0,6191	3,6293	4,7529
<i>Lonchocarpus phaseolifolius</i>	Fabaceae	7	0,2272	1,4498	1,5535
<i>Luehea candida</i>	Malvaceae	7	0,6250	2,9842	5,0554
<i>Lysiloma divaricatum</i>	Fabaceae	9	2,6822	20,7228	26,8042
<i>Machaerium biovulatum</i>	Fabaceae	3	0,1173	0,6479	0,6180
<i>Manilkara chicle</i>	Sapotaceae	6	2,4673	22,4757	36,1441
<i>Piscidia carthagenensis</i>	Fabaceae	4	0,5030	3,8612	5,0063
<i>Pithecellobium lanceolatum</i>	Fabaceae	1	0,0647	0,3548	0,1837
<i>Plumeria rubra</i>	Apocynaceae	3	0,5287	2,6038	2,2003
<i>Rehdera trinervis</i>	Verbenaceae	6	0,6524	2,8704	2,2249
<i>Sapindus saponaria</i>	Sapindaceae	7	0,8766	4,2354	4,2492
<i>Semialarium mexicanum</i>	Celastraceae	1	0,0660	0,2784	0,1539
<i>Sideroxylon capiri</i>	Sapotaceae	2	0,7405	5,9195	5,4210
<i>Spondias mombin</i>	Anacardaceae	9	1,7675	14,7797	8,1716
<i>Spondias purpurea</i>	Anacardaceae	1	0,05921	0,1222	0,1054
<i>Stemmadenia obovata</i>	Apocynaceae	5	0,2417	1,0420	0,7648
<i>Stenocereus aragonii</i>	Cactaceae	1	0,0315	0,1099	0,0097
<i>Sterculia apetala</i>	Malvaceae	6	1,8882	17,7689	8,6198
<i>Tabebuia impetiginosa</i>	Bignoniaceae	2	0,5006	3,6255	5,2271
<i>Tabebuia ochracea</i>	Bignoniaceae	5	0,1596	0,7547	0,9056
<i>Trichilia americana</i>	Meliaceae	2	0,0745	0,4234	0,3913
Subtotal		172	34,4882	262,5800	254,6680

Anexo 2. Número de árboles, área basal, volumen y biomasa de las especies presentes en el bosque secundario mayor a 30 años del PNPV, Costa Rica. 2014.

Especie	Familia	Número de individuos	Área basal (m ² ha ⁻¹)	Volumen (m ³ ha ⁻¹)	Biomasa (Mg ha ⁻¹)
<i>Albizia niopoides</i>	Fabaceae	2	1,6055	14,8060	14,6771
<i>Allophylus occidentalis</i>	Sapindaceae	1	0,0534	0,2588	0,1894
<i>Alvaradoa amorphoides</i>	Simaroubaceae	1	0,0332	0,1382	0,1254
<i>Annona purpurea</i>	Annonaceae	1	0,0191	0,0786	0,0562
<i>Astronium graveolens</i>	Anacardaceae	39	4,3736	29,4143	35,2139
<i>Bombacopsis quinata</i>	Malvaceae	3	1,9831	15,8769	9,7239
<i>Brosimum alicastrum</i>	Moraceae	8	4,2201	30,8664	33,2478
<i>Bursera simaruba</i>	Burseraceae	9	0,7790	4,3770	2,2787
<i>Caesalpinia eriostachys</i>	Fabaceae	6	1,3847	8,3644	9,4033
<i>Calycophyllum candidissimum</i>	Rubiaceae	13	2,4177	15,0572	16,9588
<i>Capparis indica</i>	Capparaceae	3	0,0558	0,1410	0,1318
<i>Ceiba pentandra</i>	Malvaceae	1	0,0928	0,4542	0,1601
<i>Cordia alliodora</i>	Cordiaceae	3	0,1489	0,6216	0,5181
<i>Guaiacum sanctum</i>	Zygophyllaceae	2	0,5259	3,2151	5,4392
<i>Guazuma ulmifolia</i>	Malvaceae	10	0,7383	3,1289	2,5454
<i>Jacquinia nervosa</i>	Theophrastaceae	1	0,0153	0,0245	0,0252
<i>Luehea candida</i>	Malvaceae	14	0,8623	3,6763	5,6056
<i>Lysiloma divaricatum</i>	Fabaceae	2	0,7013	6,2957	6,7227
<i>Machaerium biovulatum</i>	Fabaceae	3	0,1243	0,7877	0,8348
<i>Myrospermum frutescens</i>	Fabaceae	1	0,0546	0,2644	0,3202
<i>Piscidia carthagenensis</i>	Fabaceae	3	0,2278	1,4542	1,6591
<i>Plumeria rubra</i>	Apocynaceae	1	0,0171	0,0473	0,0445
<i>Randia armata</i>	Rubiaceae	2	0,0401	0,0940	0,0910
<i>Samanea samam</i>	Fabaceae	2	3,3181	32,8988	20,1851
<i>Semialarium mexicanum</i>	Celastraceae	4	0,1308	0,4032	0,2257
<i>Sideroxylon capiri</i>	Sapotaceae	3	0,7750	7,0937	8,3028
<i>Simarouba glauca</i>	Simaroubaceae	1	0,1438	1,0573	0,6395
<i>Sloanea terniflora</i>	Elaeocarpaceae	1	0,0215	0,0747	0,0880
<i>Spondias mombin</i>	Anacardaceae	18	3,0787	20,5291	11,2793
<i>Spondias purpurea</i>	Anacardaceae	1	0,0653	0,1852	0,0836
<i>Stemmadenia obovata</i>	Apocynaceae	2	0,0337	0,1262	0,1067
<i>Sterculia apetala</i>	Malvaceae	4	1,3818	9,4721	5,0102
<i>Tabebuia ochracea</i>	Bignoniaceae	7	0,4295	2,4050	3,0832
<i>Trichilia americana</i>	Meliaceae	5	0,1172	0,5073	0,4679
<i>Triplaris melaenodendron</i>	Polygonaceae	2	0,1507	0,8786	0,8299
Subtotal		179	30,1201	215,0739	196,2741

Anexo 3. Número de árboles, área basal, volumen y biomasa de las especies presentes en el bosque de secundario de 10 a 25 años del PNPV, Costa Rica. 2014.

Especie	Familia	Número de individuos	Área basal (m ² ha ⁻¹)	Volumen (m ³ ha ⁻¹)	Biomasa (Ton/ha)
<i>Acacia collinsii</i>	Fabaceae	3	0,0614	0,2288	0,2911
<i>Albizia niopoides</i>	Fabaceae	2	0,1944	0,8051	1,1011
<i>Alvaradoa amorphoides</i>	Simaroubaceae	41	3,1664	16,1429	16,0261
<i>Astronium graveolens</i>	Anacardaceae	2	0,1883	1,1940	1,3985
<i>Bauhinia glabra</i>	Fabaceae	2	0,0979	0,2135	0,2877
<i>Brosimum alicastrum</i>	Moraceae	1	0,3070	1,9264	1,8642
<i>Caesalpinia eriostachys</i>	Fabaceae	4	0,3917	2,1345	1,9439
<i>Calycophyllum candidissimum</i>	Rubiaceae	15	0,4730	2,4131	2,4123
<i>Capparis odoratissima</i>	Capparaceae	1	0,0174	0,0281	0,0267
<i>Cecropia peltata</i>	Urticaceae	1	0,0191	0,0661	0,0216
<i>Ceiba pentandra</i>	Malvaceae	1	0,4014	2,7757	0,9288
<i>Cordia collococca</i>	Cordiaceae	5	0,1402	0,7516	0,4185
<i>Guazuma ulmifolia</i>	Malvaceae	87	6,7405	24,9592	22,5933
<i>Jacquinia nervosa</i>	Theophrastaceae	2	0,0350	0,0627	0,0659
<i>Lonchocarpus minimiflorus</i>	Fabaceae	4	0,4022	1,4946	2,4196
<i>Lonchocarpus peninsularis</i>	Fabaceae	2	0,1303	0,9440	1,0202
<i>Manilkara chicle</i>	Sapotaceae	1	0,0208	0,0990	0,1406
<i>Myrospermum frutescens</i>	Fabaceae	2	0,0305	0,1251	0,1485
<i>Piscidia carthagenensis</i>	Fabaceae	8	0,2463	1,3645	1,5749
<i>Pithecellobium lanceolatum</i>	Fabaceae	3	0,1422	0,4083	0,2608
<i>Samanea samam</i>	Fabaceae	4	2,2583	15,9929	11,6347
<i>Sapindus saponaria</i>	Sapindaceae	1	0,0162	0,0558	0,0433
<i>Spondias mombin</i>	Anacardaceae	10	0,8355	5,2091	2,9056
<i>Stemmadenia obovata</i>	Apocynaceae	6	0,1348	0,3726	0,3012
<i>Sterculia apetala</i>	Malvaceae	1	0,0529	0,2887	0,1908
<i>Thouinidium decandrum</i>	Sapindaceae	4	0,1461	0,5910	0,5323
<i>Xylosma intermedia</i>	Salicaceae	3	0,1349	0,4424	0,7568
Subtotal		216	16,7848	81,0894	71,3090

Anexo 4. Densidad de la madera (IPCC, 2001 y Zanne et al, 2009) de las especies registradas en los tres estados sucesionales de bosque en PNPV, Costa Rica. 2014.

Especie	Densidad (g cm ⁻³)	Referencia	Especie	Densidad (g cm ⁻³)	Referencia
<i>Acacia collinsii</i>	0,80	Zanne et al, 2009.	<i>Lonchocarpus phaseolifolius</i>	0,69	IPCC, 2001.
<i>Albizia niopoides</i>	0,63	Zanne et al, 2009.	<i>Luehea candida</i>	0,91	Zanne et al, 2009.
<i>Allophylus occidentalis</i>	0,45	IPCC, 2001.	<i>Lysiloma divaricatum</i>	0,73	IPCC, 2001.
<i>Alvaradoa amorphoides</i>	0,58	Zanne et al, 2009.	<i>Machaerium biovulatum</i>	0,70	IPCC, 2001.
<i>Annona purpurea</i>	0,57	IPCC, 2001.	<i>Manilkara chicle</i>	1,04	Zanne et al, 2009.
<i>Astronium graveolens</i>	0,75	Zanne et al, 2009.	<i>Myrospermum frutescens</i>	0,83	Zanne et al, 2009.
<i>Bauhinia glabra</i>	0,60	Zanne et al, 2009.	<i>Piscidia carthagenensis</i>	0,80	Zanne et al, 2009.
<i>Bombacopsis quinata</i>	0,39	IPCC, 2001.	<i>Pithecellobium lanceolatum</i>	0,36	Zanne et al, 2009.
<i>Brosimum alicastrum</i>	0,69	IPCC, 2001.	<i>Plumeria rubra</i>	0,50	Zanne et al, 2009.
<i>Bursera glabra</i>	0,29	IPCC, 2001.	<i>Randia armata</i>	0,69	Zanne et al, 2009.
<i>Bursera simaruba</i>	0,33	Zanne et al, 2009.	<i>Rehdera trinervis</i>	0,47	Zanne et al, 2009.
<i>Caesalpinia eriostachys</i>	0,72	Zanne et al, 2009.	<i>Samanea samam</i>	0,46	IPCC, 2001.
<i>Calycophyllum candidissimum</i>	0,73	Zanne et al, 2009.	<i>Sapindus saponaria</i>	0,60	Zanne et al, 2009.
<i>Capparis indica</i>	0,68	Zanne et al, 2009.	<i>Semialarium mexicanum</i>	0,36	IPCC, 2001.
<i>Capparis odoratissima</i>	0,68	Zanne et al, 2009.	<i>Sideroxylon capiri</i>	0,69	Zanne et al, 2009.
<i>Cecropia peltata</i>	0,30	Zanne et al, 2009.	<i>Simarouba glauca</i>	0,40	Zanne et al, 2009.
<i>Ceiba pentandra</i>	0,24	Zanne et al, 2009.	<i>Sloanea terniflora</i>	0,80	Zanne et al, 2009.
<i>Cordia alliodora</i>	0,52	Zanne et al, 2009.	<i>Spondias mombin</i>	0,36	Zanne et al, 2009.
<i>Cordia collococca</i>	0,38	Zanne et al, 2009.	<i>Spondias purpurea</i>	0,35	Zanne et al, 2009.
<i>Cordia panamensis</i>	0,48	IPCC, 2001.	<i>Stemmadenia obovata</i>	0,47	Zanne et al, 2009.
<i>Croton sp.</i>	0,40	IPCC, 2001.	<i>Stenocereus aragonii</i>	0,10	IPCC, 2001.
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	0,35	Zanne et al, 2009.	<i>Sterculia apetala</i>	0,36	Zanne et al, 2009.
<i>Guaiacum sanctum</i>	1,10	Zanne et al, 2009.	<i>Tabebuia impetiginosa</i>	0,90	Zanne et al, 2009.
<i>Guazuma ulmifolia</i>	0,51	Zanne et al, 2009.	<i>Tabebuia ochracea</i>	0,78	Zanne et al, 2009.
<i>Hura crepitans</i>	0,34	Zanne et al, 2009.	<i>Thouinidium decandrum</i>	0,67	Zanne et al, 2009.
<i>Jacquinia nervosa</i>	0,73	Zanne et al, 2009.	<i>Trichilia americana</i>	0,57	Zanne et al, 2009.
<i>Licania arborea</i>	0,65	Zanne et al, 2009.	<i>Triplaris melaenodendron</i>	0,60	Zanne et al, 2009.
<i>Lonchocarpus minimiflorus</i>	0,78	Zanne et al, 2009.	<i>Xylosma intermedia</i>	0,77	Zanne et al, 2009.
<i>Lonchocarpus peninsularis</i>	0,79	Zanne et al, 2009.	Densidad promedio	0,59	-----

Anexo 5. Especies (10) con mayor biomasa en los tres estadios sucesionales de bosque en el PNPV, Costa Rica. 2014.

Estadio sucesional	Especie	Biomasa (Mg ha ⁻¹)
Primario	<i>Brosimum alicastrum</i>	46,15
	<i>Manilkara chicle</i>	36,14
	<i>Lysiloma divaricatum</i>	26,80
	<i>Astronium graveolens</i>	17,55
	<i>Calycophyllum candidissimum</i>	14,76
	<i>Hura crepitans</i>	13,98
	<i>Bombacopsis quinata</i>	11,24
	<i>Sterculia apetala</i>	8,62
	<i>Caesalpinia eriostachys</i>	8,32
	<i>Spondias mombin</i>	8,17
		Subtotal
> 30 años	<i>Astronium graveolens</i>	35,21
	<i>Brosimum alicastrum</i>	33,25
	<i>Samanea samam</i>	20,19
	<i>Calycophyllum candidissimum</i>	16,96
	<i>Albizia niopoides</i>	14,68
	<i>Spondias mombin</i>	11,28
	<i>Bombacopsis quinata</i>	9,72
	<i>Caesalpinia eriostachys</i>	9,40
	<i>Sideroxylon capiri</i>	8,30
	<i>Lysiloma divaricatum</i>	6,72
		Subtotal
10 - 25 años	<i>Guazuma ulmifolia</i>	22,59
	<i>Alvaradoa amorphoides</i>	16,03
	<i>Samanea samam</i>	11,63
	<i>Spondias mombin</i>	2,91
	<i>Lonchocarpus minimiflorus</i>	2,42
	<i>Calycophyllum candidissimum</i>	2,41
	<i>Caesalpinia eriostachys</i>	1,94
	<i>Brosimum alicastrum</i>	1,86
	<i>Piscidia carthagenensis</i>	1,57
	<i>Astronium graveolens</i>	1,40
		Subtotal