

**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL  
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

**DIVISIÓN DE EDUCACIÓN**

**PROGRAMA DE POSGRADO**

**Evaluación de especies perennes para uso potencial en sistemas agroforestales en el  
Caribe colombiano**

**Tesis sometida a consideración de la División de Educación y la Escuela de Posgrado  
Como requisito para optar al grado de**

***MAGISTER SCIENTIAE***

**en Agroforestería y Agricultura Sostenible**

**Isueh Arenas Rubio**

**Turrialba, Costa Rica**

**2019**

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero de la estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

**MAGISTER SCIENTIAE EN AGROFORESTERÍA  
Y AGRICULTURA SOSTENIBLE**

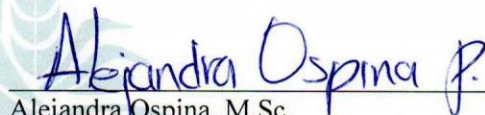
**FIRMANTES:**



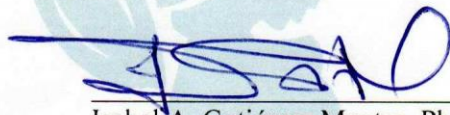
Fernando Casanoves, Ph.D.  
**Codirector de tesis**



Alejandra Martínez, Ph.D.  
**Codirectora de tesis**



Alejandra Ospina, M.Sc.  
**Miembro Comité Consejero**



Isabel A. Gutiérrez-Montes, Ph.D.  
**Decana Escuela de Posgrado**



Isueh Arenas Rubio  
**Candidata**

## ESTRUCTURA DE LA TESIS

El presente trabajo consta de dos partes principales:

La primera, aborda una introducción general y un marco teórico que permiten contextualizar la importancia de seguir generando información proveniente de resultados de investigación a través de trabajos relacionados con la producción sostenible, el manejo de recursos naturales, la agroforestería y su relación con la visión institucional del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) en el marco del convenio con la **Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia)**.

En la segunda parte, se presentan los resultados de la investigación en formato tipo artículo científico siguiendo las normas de la revista *Agroforestry Systems*. La sección del artículo es presentada en 7 apartados: (i) resumen, (ii) introducción, (iii) metodología, (iv) resultados, (v) discusión, (vi) conclusiones y (vii) referencias.

## Índice del documento

<b>Introducción general</b> .....	1
<b>1. Objetivos</b> .....	3
1.1. <b>Objetivo general</b> .....	3
1.2. <b>Objetivos específicos</b> .....	3
1.3. <b>Preguntas de investigación</b> .....	3
<b>2. Marco referencial</b> .....	5
2.1. <b>Pérdida de especies forestales en la región Caribe colombiana</b> .....	5
2.1.1. <b>La legislación colombiana protege la biodiversidad</b> .....	6
2.1.2. <b>Especies priorizadas en el Caribe colombiano</b> .....	8
2.2. <b>La agroforestería como herramienta para diversificar la producción</b> .....	10
2.2.1. <b>Los sistemas agroforestales</b> .....	11
2.2.2. <b>Los servicios eco sistémicos</b> .....	12
<b>3. Manuscrito científico</b> .....	14
3.1. <b>Resumen</b> .....	14
<b>Abstract</b> .....	15
3.2. <b>Introducción</b> .....	16
3.3. <b>Materiales y métodos</b> .....	17
3.3.1. <b>Ubicación del experimento y especies forestales</b> .....	17
3.3.2. <b>Colecta de datos</b> .....	18
3.3.3. <b>Análisis de datos</b> .....	20
3.4. <b>Resultados</b> .....	21
3.4.1. <b>Tasa de crecimiento</b> .....	21
3.4.2. <b>Producción forestal</b> .....	25
3.4.3. <b>Cobertura arbórea</b> .....	28
3.5. <b>Discusión</b> .....	30
3.6. <b>Conclusiones</b> .....	33
<b>Recomendaciones</b> .....	34
3.7. <b>Referencias</b> .....	35
<b>Anexos</b> .....	45

## Índice de cuadros

<b>Cuadro 1.</b> Estado de la investigación sobre los bosques en la región Caribe colombiana.....	6
<b>Cuadro 2.</b> Uso y propiedades conocidas de las especies forestales evaluadas, donde: (c): especie priorizada para la conservación, (p): especie en peligro de extinción, (s): especie que se siembra comercialmente en el Caribe colombiano y (v): especie vulnerable.....	9
<b>Cuadro 3.</b> Objetivos del desarrollo sostenible asociados a la agroforestería .....	10
<b>Cuadro 4.</b> Beneficios de los sistemas agroforestales .....	11
<b>Cuadro 5.</b> Clasificación de los sistemas agroforestales. Tomado de Nair (1993).....	12
<b>Cuadro 6.</b> Clasificación de los servicios eco sistémicos.....	13
<b>Cuadro 7.</b> Variables dasométricas utilizadas para realizar cálculos, donde: (N): número de individuos, (S): sobrevivencia, ( $H_c$ ): altura comercial, ( $D_c$ ): diámetro de la copa, (ff): factor de forma del volumen maderable, ( $O_c$ ): oclusión de las copas de los árboles, (DM): densidad de la madera, (feb): factor de expansión de la biomasa .....	21
<b>Cuadro 8.</b> Coeficientes de los efectos fijos ( $\beta_0$ y $\beta_1$ ) del crecimiento (Y) expresado en altura total (m) para cada especie forestal en etapa juvenil, de acuerdo a la formula $Y = \beta_0 + \beta_1(x)$ , donde: (x): edad en meses en el rango de evaluación de los 3 a los 49 meses, ( $R^2$ ): coeficiente de determinación, ( $\mu$ ): media y (E.E): error estándar .....	23
<b>Cuadro 9.</b> Coeficientes de los efectos fijos ( $\beta_0$ y $\beta_1$ ) del crecimiento (Y) expresado en el diámetro a la altura del pecho (cm) para cada especie forestal en etapa juvenil, de acuerdo a la formula $Y = \beta_0 + \beta_1(x)$ , donde: (x): edad en meses en el rango de evaluación de los 7 a los 49 meses, ( $R^2$ ): coeficiente de determinación, ( $\mu$ ): media y (E.E): error estándar .....	25
<b>Cuadro 10.</b> Prueba de comparación de medias DGC para la variable volumen comercial por especie y edad, donde: ( $\mu$ ): media y (E.E): error estándar .....	27

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Esquema metodológico de la investigación.....	4
<b>Figura 2.</b> Mapa de Colombia. (2a) ubicación de los Centros de Investigación de Agrosavia y (2b) regiones naturales (Mapsofworld 2011; WordPress 2017) .....	8
<b>Figura 3. (3a)</b> Croquis del diseño experimental en pleno, (3b) detalle de la ubicación de los árboles en los cuales se realizaron las mediciones para estimar alturas y el diámetro, (3c) detalle de las áreas seleccionadas para la medición del diámetro de copa y el factor de forma del volumen y (3d) punto de medición para la oclusión.....	19
<b>Figura 4.</b> Curvas de crecimiento en altura total para las especies en etapa juvenil (promedios en el Anexo 2).....	22
<b>Figura 5.</b> Curvas de crecimiento en DAP para las especies en etapa juvenil (promedio de los datos en el Anexo 3).....	24
<b>Figura 6.</b> Curvas de crecimiento en volumen maderable para las especies en etapa juvenil .....	26
<b>Figura 7.</b> Curvas del carbono aéreo acumulado por las especies en etapa juvenil.....	28
<b>Figura 8.</b> Cobertura arbórea de las especies a los 49 meses de edad .....	29
<b>Figura 9.</b> Representación de la cobertura arbórea en tercera dimensión y la parcela para las especies A. polyneuron, P. quinata y S. saman. Los cuadros negros corresponden a la ubicación de los árboles y los colores grises representan la sombra en cada punto.....	29

## Índice de anexos

<b>Anexo 1.</b> Edad de los árboles durante cada medición de las variables .....	45
<b>Anexo 2.</b> Promedio de la altura total con sus errores estándar por especie durante la etapa juvenil (3 a 49 meses de edad) .....	46
<b>Anexo 3.</b> Promedio del diámetro a la altura del pecho con sus errores estándar por especie durante la etapa juvenil (7 a 49 meses de edad). Esta variable se tomó cuando los árboles alcanzaron 1.3 m de altura y por esta razón se inició a partir del séptimo mes .....	47

## Lista de acrónimos, siglas, abreviaturas y unidades

<b>ACI</b>	Agricultura Climáticamente Inteligente
<b>Agrosavia</b>	Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, anteriormente conocida como <b>Corpoica</b>
<b>BioGeoEco</b>	Biodiversidad, geología y ecología
<b>Ca</b>	Cobertura arbórea (%)
<b>CATIE</b>	Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
<b>BST</b>	Bosque Seco Tropical
<b>CEPAL</b>	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
<b>CTI</b>	Ciencia, tecnología e innovación
<b>D<sub>c</sub></b>	Diámetro de la copa
<b>DAP</b>	Diámetro a la altura del pecho, también D <sub>1.3</sub> (cm)
<b>DM</b>	Densidad de la madera
<b>FAO</b>	Food and Agriculture Organization
<b>fe</b>	Factor de expansión de la biomasa
<b>ff</b>	Factor de forma del volumen comercial
<b>GEI</b>	Gases Efecto Invernadero
<b>H<sub>c</sub></b>	Altura comercial (m)
<b>H<sub>T</sub></b>	Altura total (m)
<b>I+D+i</b>	Investigación, desarrollo e innovación
<b>IDEAM</b>	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
<b>IPCC</b>	Intergovernmental Panel on Climate Change
<b>ITTO</b>	International Tropical Timber Organization
<b>MADR</b>	Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural
<b>MADS</b>	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
<b>MinHacienda</b>	Ministerio de Hacienda y Crédito Público
<b>NOAA</b>	National Oceanic and Atmospheric Administration
<b>NU</b>	Naciones Unidas
<b>ODS</b>	Objetivos del Desarrollo Sostenible
<b>PECTIA</b>	Plan estratégico de ciencia, tecnología e innovación agropecuaria
<b>PSA</b>	Pago por servicios ambientales
<b>SAF</b>	Sistemas agroforestales
<b>SE</b>	Servicios ecosistémicos
<b>SINIA</b>	Sistema Nacional de Innovación Agropecuaria
<b>UICN</b>	Unión Internacional para la Conservación de la naturaleza
<b>USDA</b>	United States Department of Agriculture
<b>V<sub>c</sub></b>	Volumen comercial (m <sup>3</sup> )



## Introducción general

El modelo de producción agropecuaria convencional, ha dejado algunas secuelas como: (i) la pérdida de la biodiversidad debido al uso indiscriminado de agroquímicos, (ii) la disminución del carbono y el nitrógeno en los suelos debido a la degradación causada por la escorrentía y la sedimentación (Bach 2011; Vergara 2015) y (iii) el desplazamiento de las poblaciones humanas nativas y las comunidades rurales a los bosques, lo que ha ocasionado una amenaza constante para el paisaje (MADS 2017). Lo anterior, sugiere que el modelo productivo actual no es el más eficiente, por ello, es necesario cambiarlo (Geertsema et al. 2016).

En la última década se ha incrementado la temperatura media anual en la región Caribe colombiana, limitando la disponibilidad de agua, lo que ha generado una reducción de las áreas con condiciones óptimas para la siembra de los cultivos tradicionales como banano, algodón, plátano, maíz, arroz, ñame, palma africana, caña de azúcar, café, yuca y pastos con vocación ganadera (Pizano et al. 2014). Con lo anterior, se ha generado la necesidad de buscar nuevas tierras aptas para la agricultura consecuencia de la baja productividad, generando zonas desprovistas de árboles en las fronteras de los bosques, los setos, las márgenes de los campos que son importantes para regular la polinización, también se han perdido ecosistemas terrestres por la erosión del suelo causada por la escorrentía del agua, ya que los árboles protegen de la erosión al suelo gracias al sistema radicular (Burkhard y Maes 2017).

La expansión de la frontera agropecuaria, ha desertificado las tierras del bosque seco tropical colombiano debido a la producción ganadera (32%) y a la agricultura, la construcción de vías y la tala de árboles para la venta ilegal de madera (27%), lo que ha generado que algunas especies maderables estén en peligro de extinción (Pizano et al. 2014). El Gobierno colombiano ha priorizado la conservación de las especies en peligro por medio de la resolución 0192 de 2014 (MADS 2014).

De acuerdo con la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2018), los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS), visibilizan la intensificación agrícola sostenible, como solución a la creciente demanda por aumentar la producción de alimentos, al mismo tiempo que se preservan los recursos naturales del planeta. La intensificación sostenible además, genera oportunidades para reducir los impactos negativos que ha dejado la industrialización de la agricultura (Geertsema et al. 2016). La agroforestería como estrategia para la intensificación agrícola, está relacionada de manera directa con los siguientes ODS; (i) hambre cero, (ii) salud y bienestar, (iii) agua limpia y saneamiento, (vi) ciudades y comunidades sostenibles, (v) producción y consumo responsable, (vi) acción por el clima y (vii) vida de ecosistemas terrestres (Vélez Agudelo et al. 2018).

La incorporación de árboles contribuye a la conservación de la biodiversidad, el ciclaje de nutrientes, la recuperación de suelos erosionados, la producción de madera, la regulación de la sombra entre otros servicios eco sistémicos (Torquebiau 2000), siendo la agroforestería una alternativa para diversificar la producción agropecuaria (FAO 2013). La agroforestería es una

forma de cultivo múltiple con al menos una especie perenne interactuando biológicamente con un sistema de producción agrícola o pecuario (Somarriba 1992), y aunque es una técnica antigua, se dejó de usar debido a la revolución industrial en su afán de producir más alimentos para la creciente población humana (Geertsema et al. 2016).

El CATIE suscribió un convenio de cooperación con Agrosavia para formar profesionales colombianos en: (i) agroforestería y agricultura sostenible, (ii) manejo integral de cuencas, (iii) manejo y conservación de bosques tropicales y biodiversidad, (iv) economía, desarrollo y cambio climático. Lo anterior, para que estos profesionales al regresar a Colombia, su país de origen, fortalezcan el desarrollo agropecuario por medio de la implementación de proyectos de investigación encaminados a mejorar la producción agropecuaria de manera sostenible (Corpoica 2017b).

Una de las funciones de Agrosavia es la protección de especies maderables en vía de extinción (Mulford Soto 2018). En la región Caribe colombiana, por ejemplo, se priorizaron nueve especies forestales: Carreto (*Aspidosperma polyneuron*), Guayacán (*Bulnesia arborea*), Ébano (*Caesalpinia ebano*), Macondo (*Cavanillesia platanifolia*), Ceiba roja (*Pachira quinata*), Nazareno (*Peltogyne purpurea*), Campano (*Samanea saman*), Roble (*Tabebuia rosea*) y Teca (*Tectona grandis*). Lo anterior, dentro del proyecto denominado “Estrategias de planificación y manejo de plantaciones forestales y agroforestales” ejecutado con recursos del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. La selección de estas especies se realizó con base en la importancia económica por su alto potencial maderable, tal es el caso de especies introducidas como la Teca, y con base en la necesidad de conservar la biodiversidad del ecosistema de la región, principalmente con especies nativas como el Guayacán (Yacomelo 2015).

La presente investigación, se desarrolló dentro del convenio Agrosavia-CATIE. Se generó información sobre la producción forestal, cobertura arbórea, y carbono aéreo acumulado en la etapa juvenil de las especies priorizadas para su uso potencial en sistemas agroforestales, que a futuro permitirán no solo mitigar el impacto del clima sino también conservar los recursos en la región y reestablecer la provisión de servicios eco sistémicos. Así mismo, es la base inicial para realizar futuras propuestas de conservación, restauración ecológica y producción forestal ofreciendo alternativas de diversificación agrícola, en busca de la promoción de la seguridad alimentaria de los productores.

## **1. Objetivos**

### **1.1. Objetivo general**

Evaluar el potencial de la producción forestal, la captura de carbono y la cobertura arbórea de nueve especies forestales para su uso potencial en sistemas agroforestales en el Caribe colombiano.

### **1.2. Objetivos específicos**

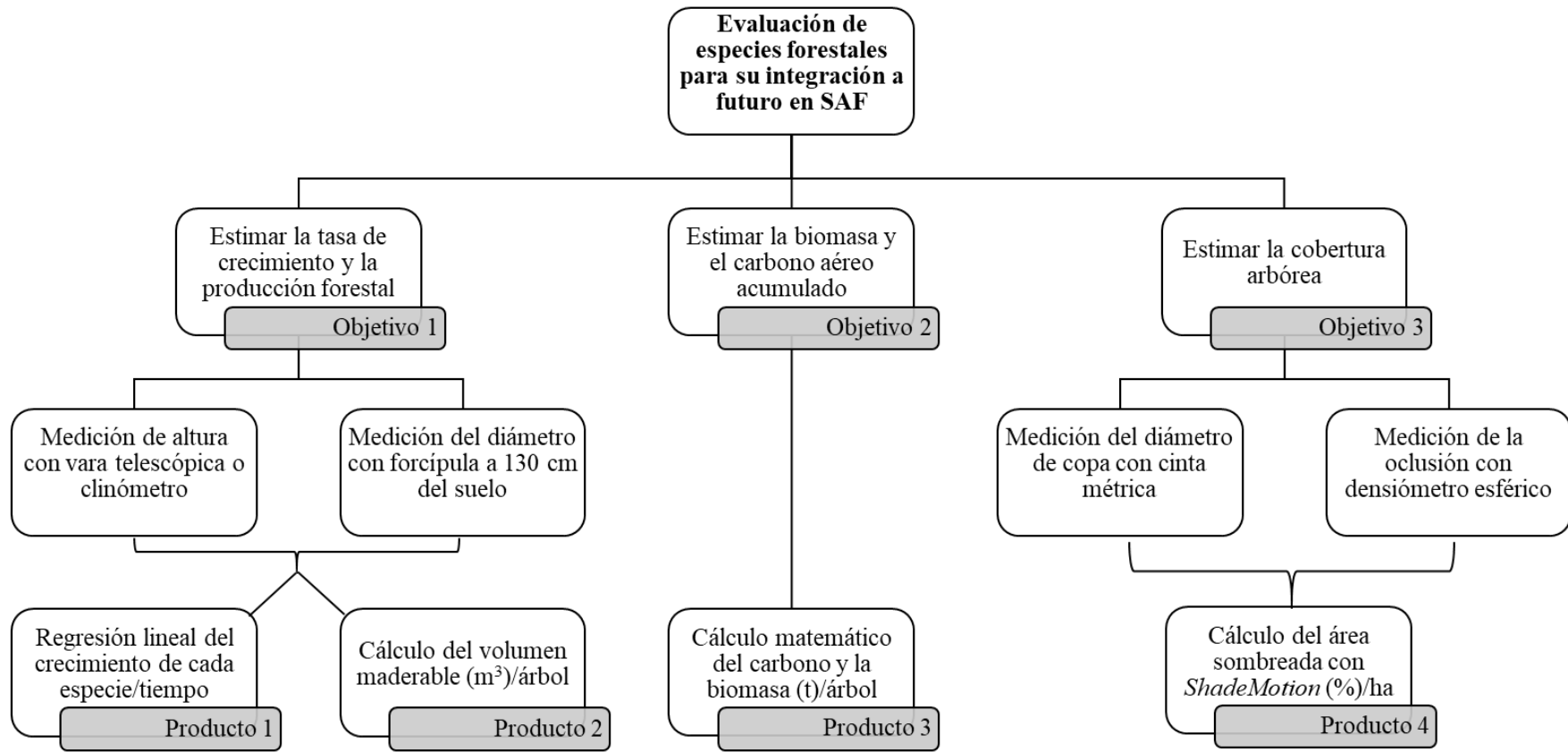
- Estimar la tasa de crecimiento y la producción forestal expresada en volumen maderable durante la etapa juvenil.
- Estimar la biomasa y el carbono aéreo acumulado de las especies en su etapa juvenil
- Estimar la cobertura arbórea para su integración a futuro en sistemas agroforestales

### **1.3. Preguntas de investigación**

- ¿Cuál especie tiene la mayor producción forestal en su etapa juvenil?
- ¿Cuál especie presenta la mayor cantidad de carbono aéreo acumulado?
- ¿Cuál es el aporte de cada especie en términos de cobertura arbórea?

A continuación, se presenta el esquema metodológico que permitió cumplir los objetivos de la investigación y responder las preguntas de investigación.

Figura 1. Esquema metodológico de la investigación



## 2. Marco referencial

### 2.1. Pérdida de especies forestales en la región Caribe colombiana

La producción de madera en Latinoamérica para el año 2016 fue de seis millones de metros cúbicos, siendo los países productores más importantes Brasil, Perú, Bolivia, Costa Rica, Ecuador y Colombia, quienes conjuntamente aportaron el 46% de la producción de la región (ITTO 2016). Moreno et al. (2016), indicó que en Colombia la tala ilegal representa 800,000 m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> de la producción total de madera. Dentro de las causas que han ocasionado la pérdida de las especies forestales en Colombia, se encuentra la tala de árboles nativos; esta actividad se ha realizado durante décadas con fines comerciales de manera ilegal, tradicionalmente se ha usado la madera por parte de las comunidades rurales como leña para generar fuego con fines de calefacción y preparación de alimentos (Pizano et al. 2016). En el año 2017, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible reportó que entre el año 1990 y el año 2016 han sido deforestadas más de seis millones de hectáreas de bosque colombiano, a causa de la construcción de vías y carreteras con miras al desarrollo económico del país (MADS 2017), también las industrias ubicadas en la región, por ejemplo, las extractoras de aceite de palma (Biogeoeco 2016) las fábricas que producen cemento y los complejos carboníferos cuya actividad principal es la extracción a cielo abierto (Gualdrón Acosta 2011), generan impactos negativos en el medio ambiente por la contaminación del suelo, el aire y el agua, ya que la remoción del manto terrestre afecta drásticamente el paisaje por la pérdida del hábitat óptimo para la flora y fauna nativa (Barros-Maestre y Granados 2016). Lo anterior ha ocasionado una degradación forestal y en consecuencia una pérdida invaluable de biodiversidad. (Montagnini et al. 2015).

El MADS (2017) indicó que la región Caribe colombiana fue afectada fuertemente por el conflicto armado entre 1990 y 2013, dando origen al desplazamiento de la población y generando una alta presión en las zonas de bosque que sirvieron de refugio a comunidades de Carmen de Bolívar, El Salado y Montes de María. Esto aumentó la deforestación, debido a la ampliación de la frontera agropecuaria, el aumento en las áreas de cultivos ilícitos, la minería y la extracción ilegal de madera. Pizano et al. (2014) reportó que el bosque seco tropical colombiano presentó un 65% de desertificación en las áreas de tala de bosque dedicadas a la actividad agropecuaria. Estas actividades han deteriorado los ecosistemas a causa de la disminución en la densidad de las especies forestales nativas, y como resultado algunas especies se encuentran en riesgo y peligro de extinción (Cárdenas López et al. 2007). Parrado-Roseelli et al. (2016) reportaron que la investigación realizada en la región Caribe es escasa con respecto a otras regiones de Colombia (Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Estado de la investigación sobre los bosques en la región Caribe colombiana

<b>Tema de estudio</b>	<b>Publicaciones</b>
Uso por comunidades humanas	12
Dinámica de disturbios	11
Ciclos, reproducción, regeneración y crecimiento	6
Relación suelo-vegetación	5
Historia natural	4
Dinámica poblacional	3
Rasgos funcionales, uso de hábitat	2
Fauna	1
Procesos genéticos, productividad, relaciones suelo-fauna y planta-animal	0

Tomado y adaptado de Parrado-Roseelli et al. (2016)

### **2.1.1. La legislación colombiana protege la biodiversidad**

La Organización Internacional de las Maderas Tropicales ha fomentado la creación de planes y recomendaciones enfocadas al uso de especies nativas para la conservación de la biodiversidad, en los países que registran especies forestales en peligro de extinción (ITTO 2017). La necesidad de preservar los bosques colombianos se debe a que son un recurso importante porque regulan el ciclo del agua, protegen los suelos, son el hábitat de miles de especies de plantas y animales, son fuente de muchos recursos, son el territorio de vida para las comunidades que los habitan y contribuyen a regular el clima (MADS 2012a).

Más del 50% del territorio continental colombiano corresponde a bosques, con 59 millones de hectáreas, siendo la Amazonía y el Pacífico las regiones con mayor cobertura (MADS 2012a). Los esfuerzos del gobierno han permitido que en la actualidad se hayan superado las 28 millones de hectáreas en áreas protegidas que garantizan la conservación de la flora, fauna y los ecosistemas (PNNC 2018). El MADS durante los últimos años generó la política para la gestión de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos (MADS 2012b), identificando a las especies de plantas y animales silvestres amenazadas en todo el territorio nacional (MADS 2014), al mismo tiempo, se han generado planes de restauración ecológica, rehabilitación y recuperación de áreas perturbadas (MADS 2015), por medio de estrategias enfocadas al control de la deforestación (MADS 2017).

Dentro de las metas nacionales de Colombia se determinó que el país debe incorporar la gestión del cambio climático en las decisiones públicas y privadas para bajar los niveles de emisión de carbono en un 20% al año 2030, potenciar la resiliencia al cambio climático y reducir el riesgo de inseguridad alimentaria (Florián Buitrago et al. 2017). Los principales gases que generan el efecto invernadero son: dióxido de carbono, con una concentración en la atmósfera de 408 ppm, metano, con 1.75 ppm y óxido nitroso, con 0.3 ppm. El dióxido de carbono es el que se encuentra en mayor concentración y por ello las acciones de mitigación se enfocan a este gas (NOAA 2018). Por este motivo, se estableció el decreto 926 de 2017, en donde por primera

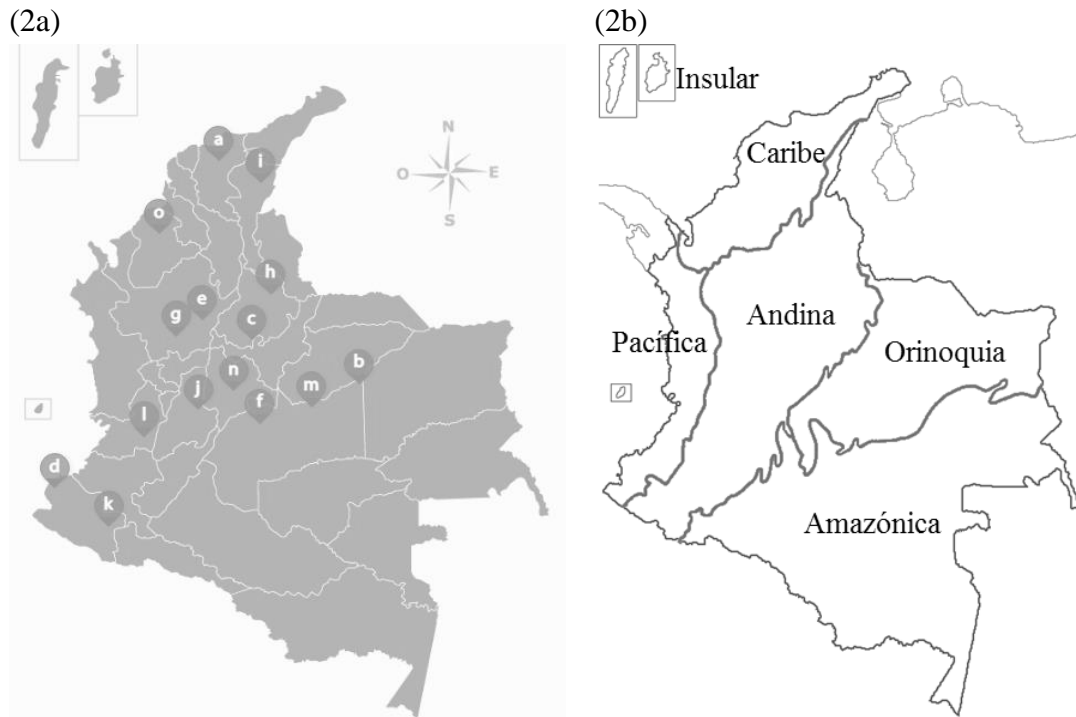
vez en Colombia se incluye el impuesto nacional al carbono dirigido a la producción y comercialización de combustibles fósiles (MinHacienda 2017).

En la región Caribe, el departamento del Magdalena ha avanzado con el Plan de Gestión Integral del Cambio Climático. Por medio de un diagnóstico, se evidenció la vulnerabilidad de la población en términos de seguridad alimentaria, recurso hídrico, salud, hábitat humano, infraestructura, biodiversidad y SE. El plan de acción prioriza dentro de sus ejes de trabajo la biodiversidad, los ecosistemas y los SE, haciendo énfasis en la restauración del bosque seco, la protección de zonas costeras y la recuperación de bosques de importancia hídrica a través de los Pagos por Servicios Ambientales (PSA). Así mismo, como eje de trabajo se priorizó al sector agropecuario y pesquero, buscando que al año 2040 el departamento pueda reconocerse por ser altamente productivo, adaptado al cambio climático y con un uso racional de los recursos naturales; para lograr estos objetivos se promueve la implementación de la ganadería sostenible, la optimización del recurso hídrico, la recuperación ambiental de los humedales continentales (MADS 2016). Lo anterior será posible con la financiación de proyectos sostenibles en zonas con brechas de desarrollo rural, como lo establece el artículo 223 de la Ley 1819 de 2016 (Congreso de Colombia 2016).

La búsqueda de alternativas para mitigar el impacto climático y la necesidad de los industriales en el cumplimiento de las políticas de responsabilidad social empresarial, han promovido el interés por conservar el bosque por medio de la reforestación de especies nativas en zonas degradadas, favoreciendo así la creación de nichos, los corredores biológicos que favorecen el hábitat de la flora nativa, la fauna local, regional y migratoria (Biogeoeoco 2016).

Conociendo las necesidades de la región Caribe y los avances gubernamentales en el desarrollo de políticas en materia de financiamiento para impulsar al sector agropecuario con la ley 1731 del Congreso de Colombia (2014), le corresponde al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) y a Agrosavia apoyar el desarrollo de Planes Estratégicos de Ciencia, Tecnología e Innovación Agropecuaria (PECTIA) y orientar la Agenda Nacional de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) bajo la Política de Ciencia, Tecnología e Innovación (CTI) del Sistema Nacional de Innovación Agropecuaria (SINIA) en cumplimiento de la ley 1879 del Congreso de Colombia (2017).

Agrosavia también es la entidad encargada de desarrollar investigación, transferencia y vinculación de procesos de innovación tecnológica al sector agropecuario colombiano, desde el año 1993 ha contribuido al cambio técnico haciendo presencia en 15 puntos estratégicos a lo largo de toda Colombia (Figura 2a), cubriendo la mayoría de las regiones naturales del país (Figura 2b), con un esquema de trabajo basado en siete redes de innovación: (i) cacao, (ii) frutales, (iii) transitorios, (iv) ganadería, (v) permanentes, (vi) raíces y tubérculos, y (vii) hortalizas y aromáticas, que buscan articular la Agenda Nacional de I+D+i con entidades privadas, gremios, aliados, cadenas productivas, investigadores de diferentes disciplinas para mejorar la productividad y la competitividad agrícola (Agrosavia 2015).



**Figura 2.** Mapa de Colombia. (2a) ubicación de los Centros de Investigación de Agrosavia y (2b) regiones naturales (Mapsofworld 2011; WordPress 2017)

### 2.1.2. Especies priorizadas en el Caribe colombiano

Agrosavia, con la finalidad de cubrir los requerimientos de conservación y protección ambiental que requiere la región Caribe, generó protocolos de manejo nutricional en la fase de vivero para *Gmelina arborea* y *Pachira quinata*, lo anterior impulsó la producción de cinco millones de plántulas que se distribuyeron en los departamentos de Bolívar, Magdalena y Cesar, además. En el departamento del Atlántico, mejoró la producción ganadera con la implementación de sistemas silvopastoriles (Corpoica 2017a), y durante el año 2014 se priorizaron nueve especies forestales (Cuadro 2) por su importancia económica (Yacomelo 2015) y cultural en la región (MADS 2014) y por la necesidad de conservación debido a que algunas se encuentran en peligro de extinción (Cárdenas López et al. 2007).



**Cuadro 2.** Uso y propiedades conocidas de las especies forestales evaluadas, donde: (c): especie priorizada para la conservación, (p): especie en peligro de extinción, (s): especie que se siembra comercialmente en el Caribe colombiano y (v): especie vulnerable

Especie	c	p	s	v	Uso y propiedades conocidas
<i>Aspidosperma polyneuron</i>	*	*			Industria de la madera, agroforestería (Dos Santos Mamede y Pasa 2018), detección de toxicidad por residuos de insecticidas en el medio ambiente (De Carvalho et al. 2003), leña, carbón, curar enfermedades dermatológicas (Palencia et al. 2017) y asocio con hierba mate (Montagnini et al. 2015)
<i>Bulnesia arborea</i>	*	*			Forraje para rumiantes menores, sombra, cercas vivas, madera (García et al. 2009; Medina et al. 2008), producción de flores como melífera (Palencia et al. 2017), barreras rompe vientos (Broschat y Burch 2013) y hábitat de reptiles (Rojas Murcia et al. 2016)
<i>Caesalpinia ebano</i>			*		Leña y carbón (Palencia et al. 2017)
<i>Cavanillesia platanifolia</i>					Semillas comestibles por las comunidades afrodescendientes del Caribe colombiano (Pasquini et al. 2018), árboles dispersos (González Pacheco 2018)
<i>Pachira quinata</i>	*	*	*		Industria de la madera (Moreno et al. 2016), medicinal, leña, construcciones estructurales, artesanías, enchapados, muebles (De Sousa et al. 2017) y fuente de alimento para murciélagos (polinizadores) e insectos esfíngidos (USDA 2010)
<i>Peltogyne purpurea</i>	*			*	Industria de la madera (Moreno et al. 2016), objetos de decoración (Amaral et al. 2018), fuente de alimento para murciélagos (polinizadores) e insectos esfíngidos, uso en construcciones civiles debido a la madera extremadamente pesada con alta dureza para construir los durmientes de ferrocarriles (USDA 2010)
<i>Samanea saman</i>					Industria de la madera (puertas, camas, mesas y muebles), sombra (García et al. 2009; Quesada-Álvarez 2018), forraje (hojas y frutos) para animales (Holguín et al. 2018), sistemas silvopastoriles (Montagnini et al. 2015), árbol fijador de nitrógeno, madera dura utilizada para hacer ruedas de carretas en Centroamérica (USDA 2010)
<i>Tabebuia rosea</i>					Sombrío en espacios rurales (Pereira-Jiménez y Mora-Vega 2018), ornamental (Sharma et al. 2018), madera comparada con el roble (Montagnini et al. 2015; Moreno et al. 2016), construcciones civiles y durmientes de ferrocarriles (USDA 2010)
<i>Tectona grandis</i>			*		Alivia dolores de menstruación y presión arterial baja (Tantengco et al. 2018), madera, para la construcción (USDA 2010), objetos de decoración (Amaral et al. 2018), regulación de carbono atmosférico (Manjunatha et al. 2018) y sus hojas se han estudiado como inhibidor de la corrosión (Kodithuwakku y Edussuriya 2018)

## 2.2. La agroforestería como herramienta para diversificar la producción

El Centro Internacional para la Investigación en Agroforestería (ICRAF por sus siglas en inglés) define la agroforestería como una dinámica ecológica basada en el manejo del sistema y los recursos naturales, integrando árboles y cultivos agrícolas, diversificando la producción para obtener beneficios económicos sin dañar el medio ambiente, favoreciendo la población (Torquebiau 2000). Somarriba (1992) indicó que la agroforestería es una forma múltiple de cultivo que satisface las siguientes condiciones: (i) existen al menos dos especies de plantas que interactúan biológicamente, (ii) al menos una de esas especies es perenne arbolada y (iii) al menos una de esas especies es manejada para la producción forrajera, anual o perenne. De acuerdo a Vélez Agudelo et al. (2018) diversificar la producción por medio de la agroforestería favorecerá a los objetivos del desarrollo sostenible (ODS) (Cuadro 3)

*Cuadro 3. Objetivos del desarrollo sostenible asociados a la agroforestería*

<b>ODS</b>	<b>Beneficios de la agroforestería</b>
Hambre cero	Garantiza la seguridad alimentaria
Salud y bienestar	Genera agricultura sostenible
Agua limpia y saneamiento	Regula el ciclo del agua con el manejo de los bosques
Ciudades sostenibles	Permite generar espacios de recreación sostenible
Producción responsable	Mejora el uso de los recursos naturales
Acción por el clima	Genera adaptación y mitigación
Vida de los ecosistemas	Conserva la biodiversidad

De acuerdo con la FAO (2013), la agroforestería es una herramienta utilizada en la ACI por sus contribuciones a las buenas prácticas que mejoran la producción sostenible, adaptación y mitigación (Cuadro 4). El Banco Mundial (2015) promueve el desarrollo agropecuario usando la agroforestería como herramienta para diversificar la producción, incrementar la productividad, mejorar la resiliencia y reducir o eliminar los gases de efecto invernadero (GEI). Por ello, la identificación de especies forestales que puedan combinarse con sistemas agropecuarios en un modelo agroforestal, brinda la posibilidad de fortalecer los sistemas productivos de las poblaciones más vulnerables.

#### **Cuadro 4. Beneficios de los sistemas agroforestales**

<b>Producción sostenible</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Ciclaje de nutrientes</li><li>- Aumento de la materia orgánica y humedad del suelo</li><li>- Rotación de cultivos y diversificación de la producción</li><li>- Mejor uso de los recursos naturales</li><li>- Seguridad alimentaria</li></ul>
<b>Adaptación al cambio climático</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Los árboles mejoran el microclima</li><li>- Fomento de la resiliencia</li><li>- Aumento de servicios ecosistémicos</li><li>- Conservación de los recursos naturales</li></ul>
<b>Mitigación al cambio climático</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Mejora la producción de los cultivos</li><li>- Captura de carbono atmosférico</li></ul>

##### **2.2.1. Los sistemas agroforestales**

Los sistemas agroforestales (SAF) benefician la biodiversidad con prácticas como: (i) la implementación de árboles en hileras (Villanueva et al. 2008), (ii) el uso de árboles en cercas vivas (Ibrahim et al. 2003) o el uso de herbáceas en tiras a lo largo del cultivo (Bölöni et al. 2008), (iv) siembra de especies forestales en bordes de carreteras (Alamgir et al. 2016), (v) restaurar humedales para el aumento de las áreas protegidas (Sánchez et al. 2015), (vi) incorporar residuos vegetales al suelo (Fajardo et al. 2015), (vii) implementar sistemas productivos con arbustos y árboles nativos (De Sousa et al. 2017), (viii) reforestar zonas en riesgo a causa del cambio climático y sembrar nuevos bosques o incorporar árboles en los espacios urbanos (MADS 2017).

La implementación de sistemas agroforestales, específicamente de sistemas silvopastoriles, con la utilización de especies forestales nativas otorgan beneficios a la producción ganadera y generan potencialidades del mercado del carbono y los servicios que prestan los bosques (MADS 2012a). El impacto positivo de los SAF a escala del paisaje, se establece debido a que los ecosistemas operan a múltiples escalas espaciales y temporales. El paisaje se identifica como un territorio o espacio físico, objeto de planificación, con una gama de contenidos naturales y artificiales en el que pueden encontrarse distintos tipos de ecosistema (Somarriba 2009). Casi todos los ecosistemas son abiertos porque intercambian energía, nutrientes, especies, el paisaje es una unidad de estudio y se debe manejar como ecosistema individual, por lo tanto el mantenimiento de la biodiversidad y, la conservación de la naturaleza requieren una estrategia de manejo que tenga en cuenta el paisaje más allá de lo local (Geertsema et al. 2016). A continuación, se identifican los SAF y las respectivas prácticas agroforestales que los caracterizan (Cuadro 5).

**Cuadro 5. Clasificación de los sistemas agroforestales. Tomado de Nair (1993)**

<b>Sistema</b>	<b>Práctica agroforestal</b>
Sistema silvoagrícola (árboles incluyendo arbustos, enredaderas + cultivos)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Barbecho mejorado</li> <li>- Cultivo en callejón</li> <li>- Jardines multiestratos</li> <li>- Árboles de usos múltiples en tierras de cultivos</li> <li>- Combinación de cultivos y plantaciones</li> <li>- Huertos caseros</li> <li>- Árboles para la conservación y recuperación de suelos</li> <li>- Cinturones de protección y rompe vientos, setos vivos</li> </ul>
Sistema silvopastoril (árboles + pasturas y/o animales)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Árboles en pastizales</li> <li>- Bancos de proteínas</li> <li>- Cultivos de plantaciones con pasturas y animales</li> </ul>
Sistema agrosilvopastoril (cultivos + árboles + pasturas/animales)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Huertos caseros con animales</li> <li>- Setos leñosos de usos múltiples</li> <li>- Apicultura con árboles</li> <li>- Acuaforestería</li> <li>- Bosques de usos múltiples</li> </ul>

### **2.2.2. Los servicios eco sistémicos**

La agricultura provee alimentos, madera y fibras que se han identificado como servicios eco sistémicos (SE) de aprovisionamiento, sin embargo, también ha impactado de manera negativa a otros SE como, por ejemplo, la disponibilidad de agua, que a su vez es un recurso del cual depende la sociedad humana para sobrevivir (solo el 0.025% del agua en el mundo es potable (Fundación Aquae 2018) y la actividad agropecuaria consume el 70% de esta agua (Ecoagricultor 2018)). Por ello, se deben diseñar los sistemas agrícolas de tal manera que se pueda tener un balance en el ecosistema para evitar daños irreversibles (Gordon et al. 2010). La restauración ecológica permite que se pueda llegar a restablecer el ecosistema degradado a una condición similar al ecosistema pre-disturbio (p.ej. vegetación de las riberas de arroyos, manantiales) y sus servicios ambientales como la regulación del clima (Keenleyside et al. 2014; Meli and Carrasco-Carballido 2011) respecto a su composición, estructura y funcionamiento, favoreciendo la conectividad entre las especies (p.ej. aves y murciélagos), actuando como los únicos puntos de descanso en largas travesías, y ocurriendo de esta manera la dispersión de las semillas (MADS 2015).

Un ecosistema es un área de cualquier tamaño, con una estrecha relación o asociación de componentes físicos y biológicos organizados de tal manera que, si cambia un componente, o subsistema cambian los otros componentes, y en consecuencia el funcionamiento de todo el ecosistema (Vargas Ríos 2011). Los servicios eco sistémicos (SE) son procesos y condiciones en las que los ecosistemas y las diferentes especies que habitan allí, interactúan y satisfacen las necesidades humanas (Díaz y Cabido 2001). Müller et al. (2015) clasificó los SE en cuatro grupos: (i) aprovisionamiento, (ii) regulación (iii) culturales y (iv) de apoyo (Cuadro 6).

**Cuadro 6. Clasificación de los servicios eco sistémicos**

<b>SE</b>	<b>Definición y ejemplos</b>
Aprovisionamiento	Corresponden a los bienes producidos o proporcionados por los ecosistemas que pueden ser aprovechados directamente por los seres humanos como son alimentos, combustibles, madera, fibra, recursos genéticos, medicinas naturales y agua fresca (Casanoves et al. 2011).
Regulación	Son servicios derivados de la regulación como la calidad del aire, regulación del clima, regulación hídrica, control de erosión, regulación de plagas y enfermedades, control biológico y polinización (EEA 2018). Los árboles contribuyen a la recuperación de áreas deforestadas (Fajardo et al. 2015), mitigan el efecto de la temperatura (Guerra-De la Cruz y Galicia 2017), proveen reservas de carbono que ayudan a adaptar y desarrollar resiliencia al cambio climático (Poveda et al. 2013). La escases de agua mundial ha incentivado las investigaciones en modelación hidrológica (Lüke y Hack 2017) y modelación de los impactos del cambio climático causados a pequeños agricultores como una herramienta para la toma de decisiones (Hannah et al. 2017).
Culturales	Son los beneficios no naturales que enriquecen la calidad de vida como los valores estéticos, religiosos, espirituales, de recreación y turismo (Casanoves et al. 2011). La transformación de una función ecológica en un SE implica que dicha función genera un beneficio económico, ecológico y social (Geertsema et al. 2016). Dentro de los procesos de implementación es necesario mostrar a la comunidad los SE y documentar las experiencias (Alamgir et al. 2016), lo anterior debido a que con frecuencia no se identifica el impacto que puede generarse en la comunidad (Rapidel et al. 2015). El turismo rural es una práctica que permite sensibilizar a la comunidad y promueve la generación de un ecosistema sostenible (Danaher et al. 2016).
De apoyo	Son los servicios necesarios para la producción de otros SE (p.ej. especies y diversidad genética) (Pla et al. 2011). Incorporar especies nativas forestales proporciona espacios funcionales de reproducción, alimentación y protección para pequeños mamíferos, mariposas (Vergara 2015), enemigos naturales (Hije et al. 2017), polinizadores, reptiles (Rojas Murcia et al. 2016) y aves ((Rodríguez-Ferraro y Sanz 2007) aumentando la biodiversidad como la base para provisión de SE (Martínez-Salinas et al. 2016).

### 3. Manuscrito científico

#### Evaluación de especies forestales para uso potencial en sistemas agroforestales en el Caribe colombiano

Isueh Arenas Rubio

Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE),

[isueh.arenas@catie.ac.cr](mailto:isueh.arenas@catie.ac.cr)

##### 3.1. Resumen

La región Caribe de Colombia posee gran diversidad de flora y fauna debido a que posee pisos altitudinales a partir de los 0 m hasta los 5,775 m. El cambio climático y los procesos antropogénicos han deteriorado los recursos naturales de la región, alcanzando una desertificación del 65% del bosque seco tropical, dejando a especies en peligro de extinción. La necesidad de aumentar la producción de alimentos para la creciente población sugiere un reto, debido a que la producción agropecuaria debe ser sostenible para preservar los recursos naturales de la región. En la presente investigación se evaluó el comportamiento de las especies forestales Carreto (*Aspidosperma polyneuron*), Guayacán (*Bulnesia arborea*), Ébano (*Caesalpinia ebano*), Macondo (*Cavanillesia platanifolia*), Ceiba roja (*Pachira quinata*), Nazareno (*Peltogyne purpurea*), Campano (*Samanea saman*), Roble (*Tabebuia rosea*) y Teca (*Tectona grandis*) en crecimiento expresado en altura total y diámetro a la altura del pecho. También se estimó la producción forestal expresada en volumen maderable, carbono aéreo acumulado y la cobertura arbórea en etapa juvenil para su uso potencial en sistemas agroforestales en el Caribe colombiano. Se encontró que las especies *C. platanifolia* y *S. saman* fueron las especies de mayor crecimiento con una altura total que osciló entre los 10 m a 11 m y un diámetro a la altura que osciló entre 19 cm a 20 cm respectivamente. Estas especies pueden utilizarse en plantaciones forestales para la producción de madera ya que obtuvieron una producción forestal entre 0.11 m<sup>3</sup> a 0.16 m<sup>3</sup> a los cuatro años de edad. También pueden emplearse en proyectos que contemplen el pago por servicios ambientales por la capacidad de acumular entre 0.051 t a 0.057 t de carbono aéreo en su etapa juvenil. Las especies *A. polyneuron*, *B. arborea*, *C. ebano*, *P. quinata* y *P. purpurea* pueden emplearse para la conservación del bosque seco tropical debido a su estado de vulnerabilidad, amenaza de peligro de extinción y curvas de crecimiento lento al compararse con las otras especies, con altura total entre 3.8 m a 8.5 m, diámetro la altura del pecho entre 5.7 cm a 14.4 cm y producción maderable por debajo de 0.076 m<sup>3</sup>. Con respecto a la cobertura arbórea se encontró que las especies aportaron entre el 9% al 98%, lo que sugiere que es necesario comenzar la implementación de arreglos forestales en diferentes escenarios con las especies estudiadas.

**Palabras claves:** Bosque seco tropical, *ShadeMotion*, especies amenazadas, oclusión, factor de forma del volumen, cobertura arbórea.

## Evaluation of forest species for potential use in agroforestry systems in the Colombian Caribbean

### Abstract

The Caribbean region of Colombia have a great diversity of flora and fauna because it has altitudinal floors from 0 m to 5,775 m. Climate change and anthropogenic processes have deteriorated the natural resources of the region, reaching a desertification of 65% of the tropical dry forest, leaving endangered species. The need to increase food production for the growing population suggests a challenge, because agricultural production must be sustainable to preserve the region's natural resources. In this investigation we evaluated the behavior of the forest species in growth expressed in total height and diameter at breast height, the forest production expressed in timber volume, accumulated aerial carbon and tree cover in the juvenile stage of trees for the potential use of forest species in agroforestry systems in the Colombian Caribbean. The forest species was Carreto (*Aspidosperma polyneuron*), Guayacán (*Bulnesia arborea*), Ébano (*Caesalpinia ebano*), Macondo (*Cavanillesia platanifolia*), Ceiba roja (*Pachira quinata*), Nazareno (*Peltogyne purpurea*), Campano (*Samanea saman*), Roble (*Tabebuia rosea*) y Teca (*Tectona grandis*). We found that *C. platanifolia* and *S. saman* species were the fastest growing species with a total height that ranged between 10 m to 11 m and a diameter at a height that ranged from 19 cm to 20 cm respectively. These species can be used in forest plantations for the production of wood since they obtained a forest production between 0.11 m<sup>3</sup> to 0.16 m<sup>3</sup> at four years of age. They can also be used in projects that contemplate the payment for environmental services due to the capacity to accumulate between 0.051 t to 0.057 t of aerial carbon in its juvenile stage. The species *A. polyneuron*, *B. arborea*, *C. ebano*, *P. quinata* and *P. purpurea* can be used for the conservation of the tropical dry forest due to their state of vulnerability, threat of extinction danger and slow growth curves when compared with the other species, with total height between 3.8 m to 8.5 m, diameter at breast height between 5.7 cm to 14.4 cm and timber production below 0.076 m<sup>3</sup>. Regarding the tree cover, it was found that the species contributed between 9% and 98%, which suggests that it is necessary to begin the implementation of forest arrangements in different scenarios with the species studied.

**Keywords:** Dry tropical forest, *ShadeMotion*, threatened species, occlusion, volume form factor, tree cover.

### 3.2. Introducción

Más de la mitad del territorio continental colombiano es cobertura de bosques, con 59 millones de hectáreas, siendo la Amazonía y el Pacífico las regiones con mayor cobertura (MADS 2012a). Aunque es una gran extensión de tierra dedicada al bosque, existe gran preocupación debido al deterioro del mismo debido a: (i) la tala ilegal que representa el 42% de la producción total de madera con fines comerciales (Moreno et al. 2016), cuyo mercado está dirigido a la industria (Mark et al. 2014) dominada por China en un 63% (ITTO 2016), (ii) el cambio climático que afecta los cultivos tradicionales y genera la necesidad en los productores de buscar nuevas tierras aptas para cultivar (Bach 2011), (iii) la construcción de vías, carreteras, parques y jardines con más de seis millones de hectáreas de bosque colombiano deforestado (MADS 2017), (iv) el uso tradicional de la madera por las comunidades rurales como combustible o leña para generar fuego con fines de calefacción y preparación de alimentos (Padilla et al. 2007), (v), el desplazamiento de la población a las zonas boscosas como refugio a causa del conflicto armado y la destrucción de los bosques por grupos insurgentes para producir cultivos ilícitos (MADS 2017), (vi) la extracción minera que ocasiona contaminación de suelos, aire y agua (Barros-Maestre y Granados 2016), (vii) la pérdida de biodiversidad (Montagnini et al. 2015) debido a la disminución de la densidad de especies forestales nativas (Pizano et al. 2014), encontrándose algunas en peligro de extinción (Cárdenas López et al. 2007), y (viii) la expansión de la actividad agropecuaria que contribuye en un 65% a la desertificación del bosque seco tropical (BST) (Pizano et al. 2014).

De las actividades descritas anteriormente, la expansión de la producción agropecuaria es la que más contribuye con la deforestación (Muschler 2016), sin embargo, es una actividad que no puede detenerse porque la población humana sigue aumentando, se dice que para el año 2050, dos billones de personas necesitarán alimentos, lo que indica que la producción de alimentos deberá aumentar en un 60% (FAO 2013). Este parece un reto sencillo si se tiene en cuenta que son cuatro los cultivos catalogados como necesarios para la sobrevivencia humana (frijol, arroz, yuca y forrajes), sin embargo, no deja de ser aterrador que en la última década, no se suplían las necesidades alimenticias de la población, ya que habían 848 millones de personas padeciendo hambre en el mundo, de los cuales el 65% padecían desnutrición (Montagnini et al. 2015). Lo anterior, sugiere la necesidad de adaptar el modelo de producción agropecuaria por medio de la diversificación de la agricultura para responder a la demanda de alimentos de la población (Muschler 2016). La forma de hacerlo, es utilizando la agroforestería como una alternativa para expandir la agricultura bajo el enfoque de agricultura climáticamente inteligente (ACI), cuyo enfoque busca transformar y reorientar los sistemas agrícolas para apoyar la seguridad alimentaria bajo las nuevas realidades del cambio climático y lograr impactar los medios de vida de las comunidades (Lipper et al. 2014).

La agroforestería requiere como componente principal el uso de árboles; Torquebiau (2000) la define como “una manera de cultivar el suelo con simultánea o secuencial asociación de árboles, cultivos y animales para que el ser humano pueda beneficiarse de sus bienes y servicios”. Los Sistemas Agroforestales (SAF) son asociaciones de árboles con prácticas agrícolas o pecuarias de producción, y es un proceso reconocido cada vez más como una



disciplina de uso de la tierra (Torquebiau 2000). Dentro de los objetivos de la implementación de los SAF se busca incrementar la productividad de manera sostenible, continuar el ejercicio de la producción agropecuaria en compañía de la incorporación del componente perenne, generar ingresos conservando un equilibrio del ecosistema, mejorar el confort térmico de los animales, aumentar las reservas de carbono y establecer corredores biológicos, por medio del incremento en la cobertura arbórea en matrices agropecuarias (Dinesh et al. 2017); A futuro los SAF serán exitosos ya que reducen la vulnerabilidad que tiene la agricultura desde el punto de vista climático y se obtendrán mayores beneficios si se comparan con la agricultura tradicional (IDEAM 2011).

En la región Caribe se ubica el bosque seco tropical (BST) más representativo de Colombia, aunque de este solo queda el 8% de nueve millones de hectáreas debido a su avanzado estado de fragmentación (Pizano et al. 2016). Este estudio permitió conocer el comportamiento de nueve especies forestales priorizadas por su importancia económica para el Caribe colombiano y también para la conservación del BST, bajo el supuesto de que es posible diversificar la producción agropecuaria por medio de la incorporación de árboles como Carreto (*Aspidosperma polyneuron*), Guayacán (*Bulnesia arborea*), Ébano (*Caesalpinia ebano*), Macondo (*Cavanillesia platanifolia*), Ceiba roja (*Pachira quinata*), Nazareno (*Peltogyne purpurea*), Campano (*Samanea saman*), Roble (*Tabebuia rosea*) y Teca (*Tectona grandis*) por medio de la implementación de SAF. El presente estudio, corresponde a la etapa inicial de un largo proceso, porque los árboles en evaluación se encontraban en etapa juvenil (3 a 49 meses de edad). A futuro se pretende obtener información del comportamiento de estas especies en su edad adulta, y realizar validaciones previas de SAF que se puedan combinar. Los objetivos fueron (i) estimar la tasa de crecimiento con base en la altura comercial y el diámetro a la altura del pecho, (ii) estimar la producción forestal asociada al volumen maderable, (iii) conocer el aporte de carbono aéreo y (iv) estimar la cobertura arbórea de estas especies forestales en etapa juvenil para su uso potencial en SAF en el Caribe colombiano.

### 3.3. Materiales y métodos

#### 3.3.1. Ubicación del experimento y especies forestales

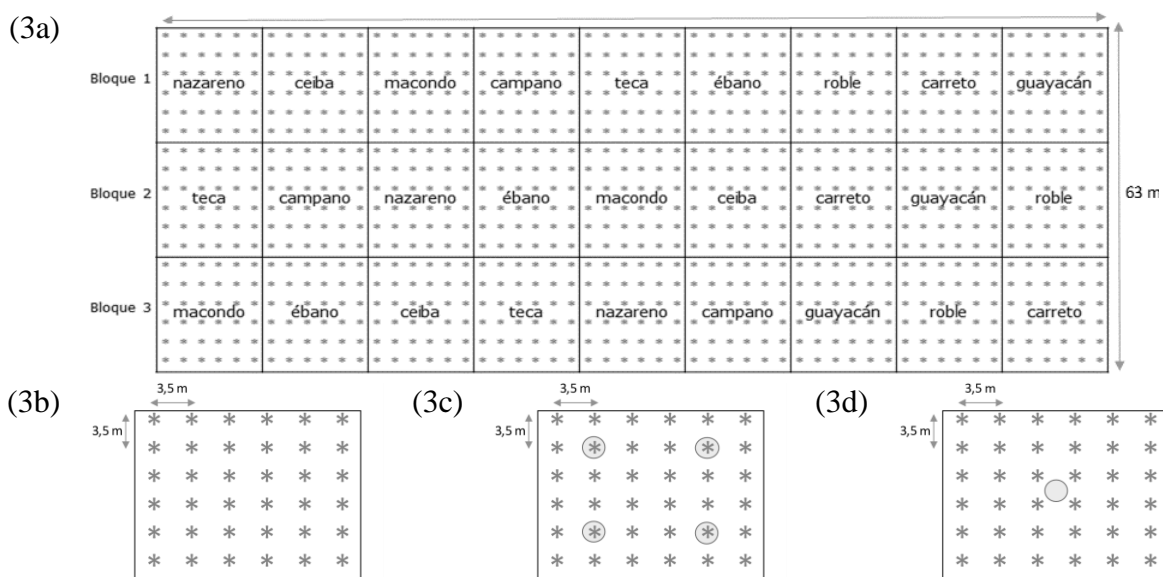
El experimento está ubicado en el Centro de Investigación Caribia de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia) en Colombia, situado en el corregimiento de Sevilla en el Municipio de Zona Bananera, (Magdalena – Colombia) a 65 km de la ciudad de Santa Marta, latitud Norte 10° 45' 51" y 74° 19' 50" longitud Oeste, a 24 m de altitud, con una temperatura promedio de 29 °C y una precipitación que oscila de 900 a 1500 mm año<sup>-1</sup>.

Las especies forestales fueron seleccionadas previamente por Yacomelo (2015), en un estudio de priorización de las especies por importancia económica en la región y la necesidad de conservación por peligro de extinción. Las especies en evaluación corresponden a *A. polyneuron*, *B. arborea*, *C. ebano*, *C. platanifolia*, *P. quinata*, *P. purpurea*, *S. saman*, *T. rosea* y *T. grandis*. Se identificaron las plantas madre de estas especies y se seleccionaron las semillas

directamente de los árboles en los municipios de San Sebastián en el departamento de Magdalena, Astrea en el departamento de Cesar, Candelaria, Manatí, Ponedera y Repelón del departamento del Atlántico. Posteriormente, se conformó un vivero de plantas que luego fueron sembradas en campo a libre exposición. Según la clasificación de la Unión Internacional para la Conservación de la naturaleza (UICN) se encuentran en estado de amenaza y en peligro las especies: *A. polyneuron*, *B. arborea*, *C. ebano*, *P. quinata* y en estado vulnerable *P. purpurea* (Cárdenas López et al. 2007), por lo que han sido priorizadas por la necesidad de conservación en Colombia según la resolución 0192 de 2014 (MADS 2014) a excepción de *C. ebano*. El hábitat de estas especies es el BST de la región Caribe que se caracteriza por poseer tierras bajas entre los 0 a 1000 m de altitud, las temperaturas medias de 25 °C a 30 °C, precipitaciones inferiores a los 100 mm año<sup>-1</sup> y al menos tres meses de sequía de acuerdo a Pizano et al. (2014).

### 3.3.2. Colecta de datos

En total se evaluaron 972 árboles de nueve especies forestales distribuidas en un diseño en bloques al azar con tres repeticiones, para un total de 27 parcelas experimentales. Cada parcela experimental disponía de 36 árboles, para un total de 108 árboles por especie. La distancia de plantación fue de 3.5 m × 3.5 m entre árboles, con un área en evaluación de 11,907 m<sup>2</sup> (63 m de ancho × 189 m de largo) (Figura 3a). Los datos fueron colectados durante el periodo de octubre de 2014 hasta diciembre de 2018, las dos primeras mediciones se realizaron con una periodicidad bimestral con la finalidad de evaluar la sobrevivencia de las especies, las tres mediciones posteriores se realizaron con una periodicidad cuatrimestral y de ahí en adelante el muestreo se realizó con una periodicidad semestral (Anexo 1).



**Figura 3.** (3a) Croquis del diseño experimental en pleno, (3b) detalle de la ubicación de los árboles en los cuales se realizaron las mediciones para estimar alturas y el diámetro, (3c) detalle de las áreas seleccionadas para la medición del diámetro de copa y el factor de forma del volumen y (3d) punto de medición para la oclusión

Sobre todos los árboles de las parcelas experimentales se realizó la medición de altura y diámetro a la altura del pecho (DAP) (Figura 3b). La determinación de las alturas de los árboles se realizó teniendo en cuenta el tamaño de los árboles, utilizando una vara telescópica en individuos que no superaban los 3.5 m de altura y en individuos con una altura superior se utilizó un clinómetro para calcular las pendientes ( $\delta$ ), la distancia ( $d$ ) hasta el árbol y se estimó la altura utilizando la fórmula:  $H = ((\delta_1 - \delta_2) / 100) \times d$  (Chave 2005). La altura total ( $H_t$ ) se midió desde el suelo hasta la yema apical (última hoja o cogollo) y la altura comercial ( $H_c$ ) midiendo desde el suelo hasta la primera bifurcación del tronco. El DAP se tomó a una altura de 1.3 m en el tronco del árbol con una forcípula, se tomaron dos mediciones de los diámetros ( $D$ ) para promediarlos y se aplicó la fórmula:  $D_{1.3} = (D_1 + D_2) / 2$  (Pearson et al. 2013).

Sobre cuatro árboles en cada parcela experimental se registró el diámetro de la copa y el factor de forma para el volumen maderable; estos árboles se escogieron de manera equidistante para evitar el efecto de las parcelas colindantes, ya que las especies difieren en tamaño y puede haber competencia entre los árboles del borde de las parcelas (Figura 3c). El diámetro de copa ( $D_c$ ) se midió con un decámetro, tomando dos ejes (Norte, Sur) y (Este, Oeste) para medir la longitud ( $l$ ) de la copa y se aplicó la fórmula:  $D_c = (l_1 + l_2) / 2$  (Detlefsen et al. 2012). El factor de forma ( $ff$ ) para determinar el volumen maderable de los árboles en pie, se determinó de acuerdo a lo propuesto por Prodan et al. (1997) y Brown (1997b), mediante la relación entre el DAP y el diámetro del tronco en la base de la copa ( $D_f$ ) con la siguiente fórmula:  $ff = D_f / D_{1.3}$ .

En el centro de cada parcela experimental (Figura 3d) se midió la oclusión de la copa ( $O_c$ ) utilizando un densiómetro esférico cóncavo recomendado para estudios agroforestales (Bellow y Nair 2003), se registró el número de puntos sombreados ( $p$ ) tomando cuatro lecturas siguiendo los puntos cardinales (Norte, Sur, Este, Oeste) y se aplicó la fórmula:  $O_c = ((p_n + p_s + p_e + p_o) / 4) / 24$ .

### 3.3.3. Análisis de datos

Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software InfoStat (Di Rienzo et al. 2018). Se realizó un análisis de varianza a la edad de 49 meses de las especies con la finalidad de conocer las diferencias entre las especies por medio de la prueba de comparaciones de LSD Fisher con nivel de significancia al 0.05 (Fisher 1937) para las variables altura total, diámetro a la altura del pecho, carbono aéreo acumulado y cobertura arbórea. También se utilizó la prueba comparaciones DGC con nivel de significancia al 0.05 (Di Rienzo et al. 2002) para la establecer las diferencias entre las especies por su volumen comercial en la etapa juvenil a partir de los 31 a los 49 meses de edad. Los datos se ajustaron seleccionando el mejor modelo con base en los criterios de Akaike (AIC) como un estimador sin sesgo entre un modelo ajustado y el modelo real (Akaike 1974) y bayesiano (BIC) como una aproximación a una transformación de la probabilidad posterior de un modelo candidato (Schwarz 1978).

La tasa de crecimiento se estimó a partir de la altura total durante la etapa juvenil (3- 49 meses de edad) y del diámetro a la altura del pecho cuando el fuste de los árboles alcanzó 1.3 m de altura. Se analizó usando análisis de regresión múltiple en el marco de los modelos lineales generales y mixtos (Balzarini et al. 2015), considerando a la especie y la edad como efectos fijos y modelando varianzas heterogéneas en el tiempo (Di Rienzo et al. 2011).

La producción forestal o volumen comercial ( $V_c$ ) por individuo, se estimó utilizando la fórmula:  $V_c = (\pi/4) \times (D_{1.3})^2 \times H_c \times ff$ , donde: ( $D_{1.3}$ ): diámetro a la altura del pecho expresado en metros, ( $H_c$ ): altura comercial, y ( $ff$ ): factor de forma para el volumen (Prodan et al. 1997). A partir de los 31 meses de edad, todas las especies superaron los 1.3 m de altura. Es por ello que solo a partir de esa edad fue posible medir el diámetro a la altura del pecho para estimar el volumen comercial. Una vez estimado el volumen comercial, se realizó un análisis de varianza usando modelos lineales generales y mixtos. Como el método de evaluación utilizado (medidas repetidas en el tiempo) requiere que la información esté completa (Di Rienzo et al. 2008), se optó por evaluar la relación entre volumen comercial y edad únicamente para cinco especies a partir de los 19 meses de edad. El modelo contempló los efectos fijos de especie y edad, con su interacción (especie  $\times$  edad) y se contempló la estructura de correlación (Di Rienzo et al. 2011).

El carbono aéreo acumulado ( $C$ ) se estimó utilizando la fórmula  $C = B \times fc$  (Callo-Concha et al. 2002), se usó como fracción de carbono ( $fc$ ) 0.48 (toneladas de carbono por tonelada de materia seca de la biomasa) como dato estándar con base en los cálculos del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) (Aalde et al. 2006) y se estimó la biomasa ( $B$ ) con base en el volumen comercial ( $V_c$ ), la densidad de la madera ( $DM$ ) y el factor de expansión de la biomasa ( $feb$ ) utilizando la fórmula general:  $B = V_c \times DM \times feb$  (Prodan et al. 1997) ya que la mayoría de las especies no poseen ecuaciones alométricas específicas para estimar la biomasa en etapa juvenil. Los valores de  $DM$  y  $feb$  fueron obtenidos a partir de revisión de literatura para las especies, en caso de no encontrarse información por especie se utilizó información reportada a nivel de género o familia (Casanoves et al. 2017). Las principales fuentes revisadas fueron Brown (1997a), Penman et al. (2003), Eggleston et al. (2006); Zanne et al. (2009) y GlobAllomeTree (2018).

La cobertura arbórea (Ca) o sombra que aporta cada especie forestal, se estimó con la fórmula  $Ca = (A_s/A_m) \times 100$ , para obtener el área que sombrea cada árbol ( $A_s$ ) se utilizó el software *ShadeMotion* 4.0.30 (CATIE 2016) considerando las medidas de las copas de los árboles (altura, forma, diámetro y opacidad). El Software permitió calcular el  $A_s$  sin traslapes, lo que no ocurre al emplear la fórmula  $A_s = (\pi/4) \times (D_c)^2 \times O_c$ , donde: ( $D_c$ ): diámetro de la copa y ( $O_c$ ): oclusión expresada en fracción (Prodan et al. 1997). El área de muestreo ( $A_m$ ) correspondió al tamaño de cada parcela 441 m<sup>2</sup> (21 m × 21 m). Se realizaron las simulaciones contemplando la totalidad de los individuos para obtener un valor promedio por cada parcela experimental.

### 3.4. Resultados

A continuación, se presentan las variables necesarias para realizar los cálculos (Cuadro 7). La densidad de la madera (DM) y el factor de expansión de la biomasa (feb) se obtuvieron de las publicaciones realizadas por los siguientes autores: Brown (1997a), Penman et al. (2003), Eggleston et al. (2006); Zanne et al. (2009) y GlobAllomeTree (2018). Las demás variables se estimaron a los 52 meses de edad de las especies forestales en evaluación.

**Cuadro 7.** Variables dasométricas utilizadas para realizar cálculos, donde: (*N*): número de individuos, (*S*): sobrevivencia, (*H<sub>c</sub>*): altura comercial, (*D<sub>c</sub>*): diámetro de la copa, (*ff*): factor de forma del volumen maderable, (*O<sub>c</sub>*): oclusión de las copas de los árboles, (*DM*): densidad de la madera, (*feb*): factor de expansión de la biomasa

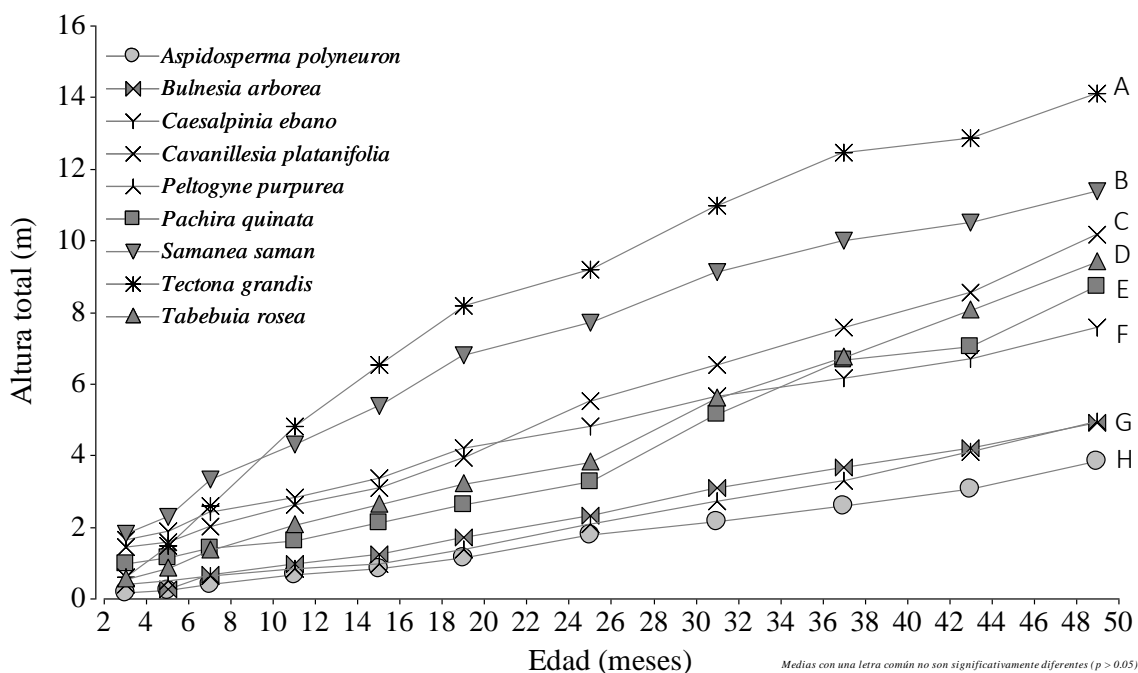
Espece	<i>N</i>	<i>S</i> (%)	<i>H<sub>c</sub></i> (m)	<i>D<sub>c</sub></i> (m)	<i>ff</i>	<i>O<sub>c</sub></i>	<i>DM</i> (t m <sup>-3</sup> )	<i>feb</i>
<i>Aspidosperma polyneuron</i>	82	76	1.73	2.58	0.85	0.41	0.77	1.5
<i>Bulnesia arborea</i>	85	79	1.81	4.43	0.60	0.78	1.00	1.5
<i>Caesalpinia ebano</i>	97	90	2.99	4.62	0.65	0.85	0.45	1.6
<i>Cavanillesia platanifolia</i>	83	77	5.15	4.42	0.71	0.85	0.60	1.5
<i>Peltogyne purpurea</i>	82	76	2.12	3.74	0.70	0.71	0.75	1.5
<i>Pachira quinata</i>	98	91	3.96	4.46	0.82	0.94	0.40	1.6
<i>Samanea saman</i>	104	96	4.99	9.48	0.79	0.97	0.45	1.6
<i>Tectona grandis</i>	89	82	7.02	5.31	0.87	0.95	0.48	1.5
<i>Tabebuia rosea</i>	71	66	3.49	4.68	0.66	0.95	0.55	1.3

En términos generales las especies tuvieron una sobrevivencia entre el 66% a 96%, la altura comercial osciló entre los 1.73 m a 7.02 m, el diámetro de la copa osciló entre 2.58 m a 9.48 m, el factor de forma del volumen osciló entre 0.60 a 0.87 y la oclusión osciló entre 0.41 a 0.95. Los reportes bibliográficos indicaron que para estas especies la densidad de la madera oscila entre 0.45 t m<sup>-3</sup> a 1 t m<sup>-3</sup> y el factor de expansión de la biomasa oscila entre 1.3 a 1.5.

#### 3.4.1. Tasa de crecimiento

Los resultados del análisis de varianza realizado a los 49 meses de edad, sugieren que hay diferencia de la altura total entre las especies ( $p < 0.0001$ ). Se observa una relación positiva entre la edad y la altura total estimada en etapa juvenil (de los 3 a 49 meses de edad). También se

puede observar que durante los primeros meses de edad las diferencias entre especies son menores y que a medida que se avanza en el tiempo las diferencias entre especies aumentan. En general la especie *T. grandis* es la que tiene los mayores valores de altura total durante todo el tiempo de evaluación, logrando al mes 49 una altura de 14.13 m y la especie con menor tamaño en altura fue *A. polyneuron* con 3.80 m. Las demás especies se encontraron en el rango de 4.92 m a 11.41m de altura (Figura 4).



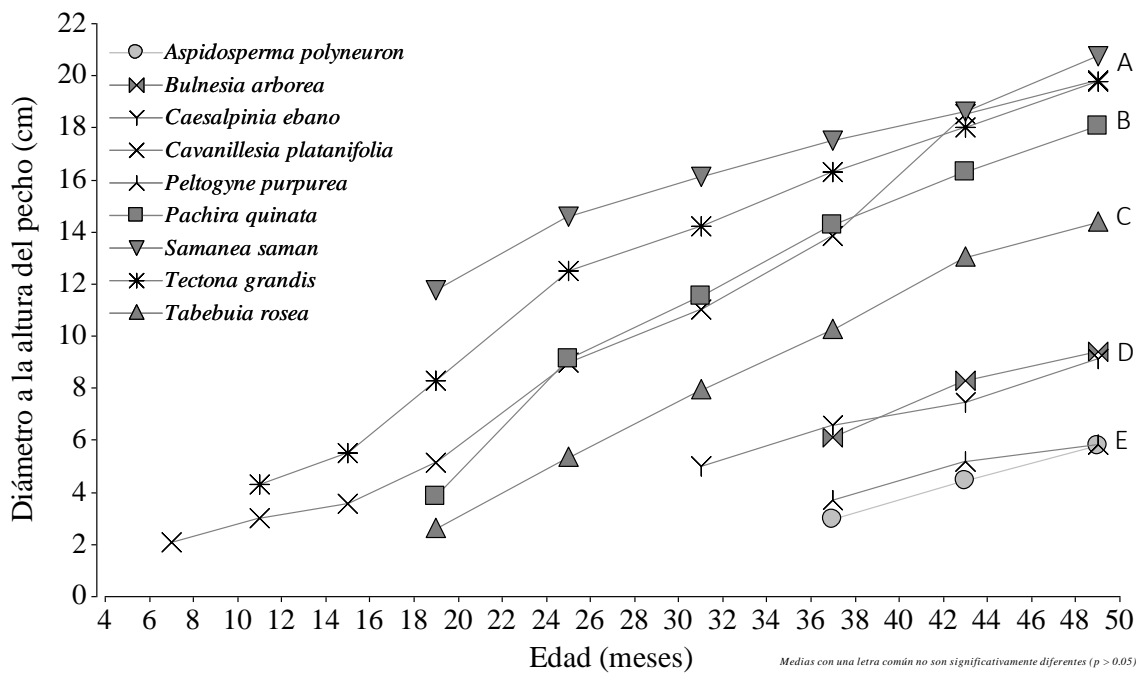
**Figura 4.** Curvas de crecimiento en altura total para las especies en etapa juvenil (promedios en el Anexo 2)

Se estimaron los coeficientes de regresión para cada una de las especies ( $p < 0.0001$ ), utilizando como variable dependiente la altura total y como variable independiente o regresora en etapa juvenil la edad. La especie con mayor tasa de crecimiento en altura fue *C. platanifolia* ( $\beta_1 = 0.48$ ), seguida de *P. quinata* ( $\beta_1 = 0.45$ ) y *T. grandis* ( $\beta_1 = 0.42$ ). La especie con menor tasa de crecimiento durante la etapa juvenil fue *P. purpurea* ( $\beta_1 = 0.18$ ), seguida de *C. ebano* ( $\beta_1 = 0.22$ ) y *A. polyneuron* ( $\beta_1 = 0.23$ ) (Cuadro 8).

**Cuadro 8.** Coeficientes de los efectos fijos ( $\beta_0$  y  $\beta_1$ ) del crecimiento ( $Y$ ) expresado en altura total ( $m$ ) para cada especie forestal en etapa juvenil, de acuerdo a la formula  $Y = \beta_0 + \beta_1(x)$ , donde: ( $x$ ): edad en meses en el rango de evaluación de los 3 a los 49 meses, ( $R^2$ ): coeficiente de determinación, ( $\mu$ ): media y ( $E.E$ ): error estándar

Especie	$\beta_0$	$\beta_1$	Valor de $R^2$
	$\mu \pm E.E$	$\mu \pm E.E$	
<i>Aspidosperma polyneuron</i>	-5.76 $\pm$ 0.98	0.23 $\pm$ 0.02	0.88
<i>Bulnesia arborea</i>	-4.62 $\pm$ 2.06	0.28 $\pm$ 0.04	0.87
<i>Caesalpinia ebano</i>	-1.89 $\pm$ 1.16	0.22 $\pm$ 0.02	0.86
<i>Cavanillesia platanifolia</i>	-3.48 $\pm$ 1.24	<b>0.48 <math>\pm</math> 0.01</b>	0.92
<i>Peltogyne purpurea</i>	-2.81 $\pm$ 1.03	0.18 $\pm$ 0.02	0.85
<i>Pachira quinata</i>	-3.23 $\pm$ 0.5	<b>0.45 <math>\pm</math> 0.01</b>	0.91
<i>Samanea saman</i>	7.09 $\pm$ 0.75	0.28 $\pm$ 0.02	0.78
<i>Tectona grandis</i>	0.31 $\pm$ 0.25	<b>0.42 <math>\pm</math> 0.01</b>	0.90
<i>Tabebuia rosea</i>	-5.03 $\pm$ 0.82	0.4 $\pm$ 0.01	0.93

Con respecto al diámetro a la altura del pecho, las especies con mayor diámetro fueron *S. saman*, *T. grandis* y *P. quinata*. Se evidencia que a partir del mes 37 todas las especies registran 1.3 m de altura, a partir de la cual se pueden determinar el DAP. La primera especie en superar los 1.3 m de altura fue *C. platanifolia* a los siete meses de edad (Figura 5).



**Figura 5.** Curvas de crecimiento en DAP para las especies en etapa juvenil (promedio de los datos en el Anexo 3)

Los resultados del análisis de varianza realizado a los 49 meses de edad, sugieren que hay diferencia del diámetro a la altura del pecho entre las especies ( $p < 0.0001$ ). Las especies con menor tasa de crecimiento diamétrico fueron *A. polyneuron* que alcanzó en el mes 49 los 5.76 cm y *P. purpurea* con 5.85 cm, comenzando a partir de los meses 31 y 37 meses de edad a reportar esta variable. Las especies *S. saman* (20.77 cm), *T. grandis* (19.79 cm) y *C. platanifolia* (19.74 cm) mostraron el mayor crecimiento del diámetro (Figura 5). Se estimaron los coeficientes de regresión para cada una de las especies ( $p < 0.0001$ ), utilizando como variable dependiente el diámetro a la altura del pecho y como variable independiente o regresora la edad en etapa juvenil. La especie con mayor tasa de crecimiento en diámetro fue *T. grandis* ( $\beta_1 = 0.28$ ), seguida de *S. saman* ( $\beta_1 = 0.21$ ) y *C. platanifolia* ( $\beta_1 = 0.19$ ). La especie con menor tasa de crecimiento durante la etapa juvenil fue *A. polyneuron* ( $\beta_1 = 0.08$ ), *P. purpurea* y *B. arborea* ( $\beta_1 = 0.10$ ) (Cuadro 9).

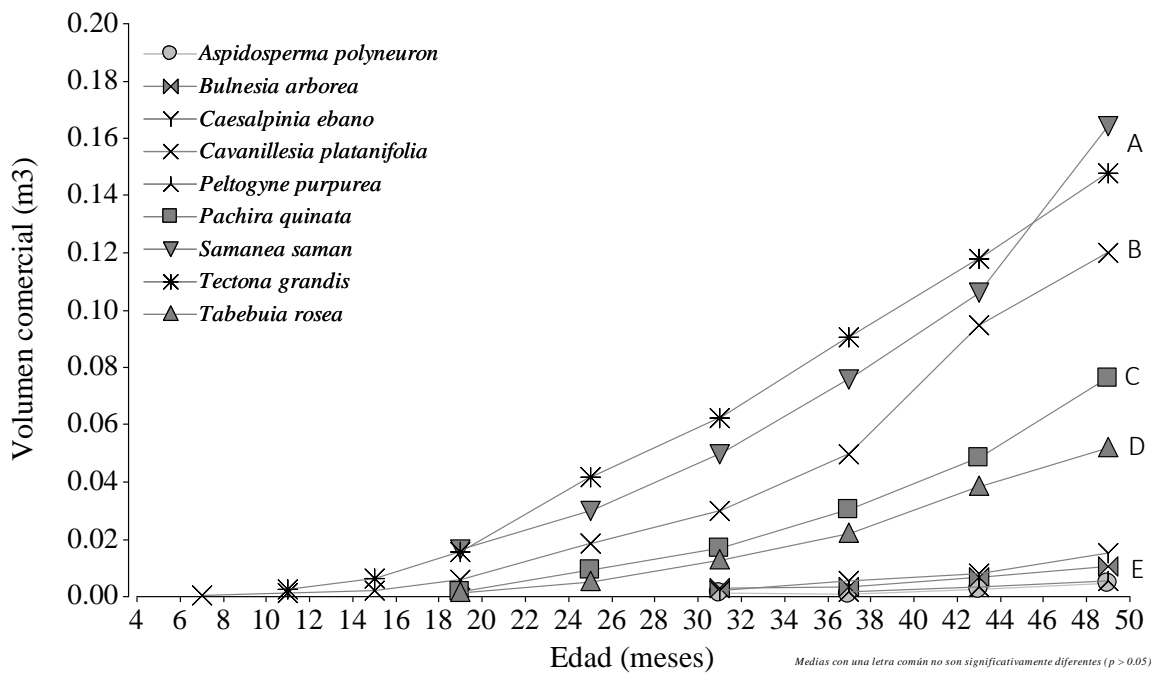


**Cuadro 9.** Coeficientes de los efectos fijos ( $\beta_0$  y  $\beta_1$ ) del crecimiento ( $Y$ ) expresado en el diámetro a la altura del pecho (cm) para cada especie forestal en etapa juvenil, de acuerdo a la fórmula  $Y = \beta_0 + \beta_1(x)$ , donde: ( $x$ ): edad en meses en el rango de evaluación de los 7 a los 49 meses, ( $R^2$ ): coeficiente de determinación, ( $\mu$ ): media y (E.E): error estándar

Especie	Y	$\beta_0$ $\mu \pm E.E$	$\beta_1$ $\mu \pm E.E$	Valor de $R^2$
<i>Aspidosperma polyneuron</i>	D <sub>1.3</sub> (cm)	-0.20 ± 0.10	0.08 ± 0.001	0.41
<i>Bulnesia arborea</i>	D <sub>1.3</sub> (cm)	-0.25 ± 0.40	0.10 ± 0.001	0.45
<i>Caesalpinia ebano</i>	D <sub>1.3</sub> (cm)	1.41 ± 0.65	0.13 ± 0.002	0.40
<i>Cavanillesia platanifolia</i>	D <sub>1.3</sub> (cm)	0.46 ± 0.56	<b>0.19 ± 0.002</b>	0.80
<i>Peltogyne purpurea</i>	D <sub>1.3</sub> (cm)	-0.19 ± 0.06	0.10 ± 0.001	0.27
<i>Pachira quinata</i>	D <sub>1.3</sub> (cm)	-0.06 ± 0.13	0.17 ± 0.002	0.67
<i>Samanea saman</i>	D <sub>1.3</sub> (cm)	1.92 ± 0.25	<b>0.21 ± 0.003</b>	0.25
<i>Tectona grandis</i>	D <sub>1.3</sub> (cm)	1.12 ± 0.20	<b>0.29 ± 0.003</b>	0.82
<i>Tabebuia rosea</i>	D <sub>1.3</sub> (cm)	-0.34 ± 0.40	0.19 ± 0.002	0.77

### 3.4.2. Producción forestal

Se observa una relación positiva entre la edad y el volumen comercial durante la etapa juvenil y a medida que se avanza en el tiempo las diferencias entre especies aumentan. Las especies que mostraron el mejor desempeño fueron *C. platanifolia*, *P. quinata*, *S. saman*, *T. grandis* y *T. rosea*. Las especies *A. polyneuron*, *B. arborea*, *C. ebano* y *P. purpurea* fueron las que presentaron menores valores de volumen a lo largo del tiempo de evaluación (Figura 6).



**Figura 6.** Curvas de crecimiento en volumen maderable para las especies en etapa juvenil

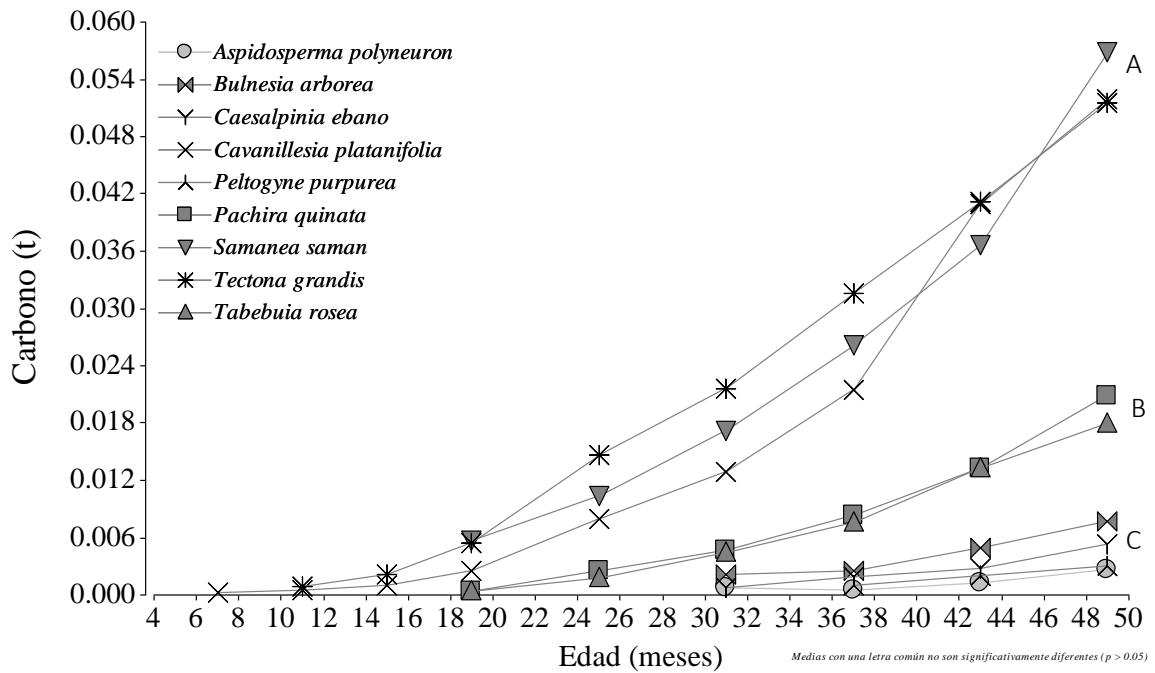
Los resultados del análisis de varianza sugieren que hay interacción Especie  $\times$  Edad ( $p < 0.0001$ ). El volumen comercial de la especie depende de la edad en la que se evalúe. En general *T. grandis* presenta los mayores valores de volumen comercial, siendo superada en el mes 49 por *S. saman*. Se evidenció que las especies *S. saman*, *T. grandis* y *C. platanifolia* tienen mejor desempeño durante los 49 meses de edad, pero no difieren significativamente (Cuadro 10), son iguales entre sí para la variable volumen comercial, El comportamiento del volumen en el periodo de evaluación es similar para todas las especies, pero a los 49 meses de edad, *S. saman* resultó ser diferente, ya que su orden respecto a las otras especies cambió entre los 43 y 49 meses de edad.

**Cuadro 10.** Prueba de comparación de medias DGC para la variable volumen comercial por especie y edad, donde: ( $\mu$ ): media y (E.E): error estándar

Especie	Edad (meses)	Volumen (m <sup>3</sup> ) $\mu \pm E.E$	Significancia
<i>Samanea saman</i>	49	<b>0.165 ± 0.035</b>	<b>a</b>
<i>Tectona grandis</i>	49	<b>0.147 ± 0.026</b>	<b>a</b>
<i>Tectona grandis</i>	43	<b>0.118 ± 0.016</b>	<b>a</b>
<i>Cavanillesia platanifolia</i>	49	<b>0.113 ± 0.015</b>	<b>a</b>
<i>Samanea saman</i>	43	<b>0.106 ± 0.014</b>	<b>a</b>
<i>Tectona grandis</i>	37	0.091 ± 0.011	b
<i>Cavanillesia platanifolia</i>	43	0.088 ± 0.010	b
<i>Samanea saman</i>	37	0.076 ± 0.008	b
<i>Pachira quinata</i>	49	0.076 ± 0.008	b
<i>Tectona grandis</i>	31	0.062 ± 0.007	b
<i>Samanea saman</i>	31	0.050 ± 0.006	c
<i>Tabebuia rosea</i>	49	0.049 ± 0.006	c
<i>Pachira quinata</i>	43	0.048 ± 0.006	c
<i>Cavanillesia platanifolia</i>	37	0.046 ± 0.005	c
<i>Tectona grandis</i>	25	0.042 ± 0.005	c
<i>Tabebuia rosea</i>	43	0.036 ± 0.005	d
<i>Samanea saman</i>	25	0.030 ± 0.004	d
<i>Pachira quinata</i>	37	0.030 ± 0.004	d
<i>Cavanillesia platanifolia</i>	31	0.027 ± 0.004	d
<i>Tabebuia rosea</i>	37	0.020 ± 0.004	e
<i>Pachira quinata</i>	31	0.017 ± 0.004	e
<i>Samanea saman</i>	19	0.017 ± 0.004	e
<i>Cavanillesia platanifolia</i>	25	0.016 ± 0.004	e
<i>Tectona grandis</i>	19	0.016 ± 0.004	e
<i>Tabebuia rosea</i>	31	0.011 ± 0.003	e
<i>Pachira quinata</i>	25	0.009 ± 0.003	e
<i>Cavanillesia platanifolia</i>	19	0.005 ± 0.003	f
<i>Tabebuia rosea</i>	25	0.005 ± 0.003	f
<i>Pachira quinata</i>	19	0.002 ± 0.003	f
<i>Tabebuia rosea</i>	19	0.001 ± 0.003	f

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

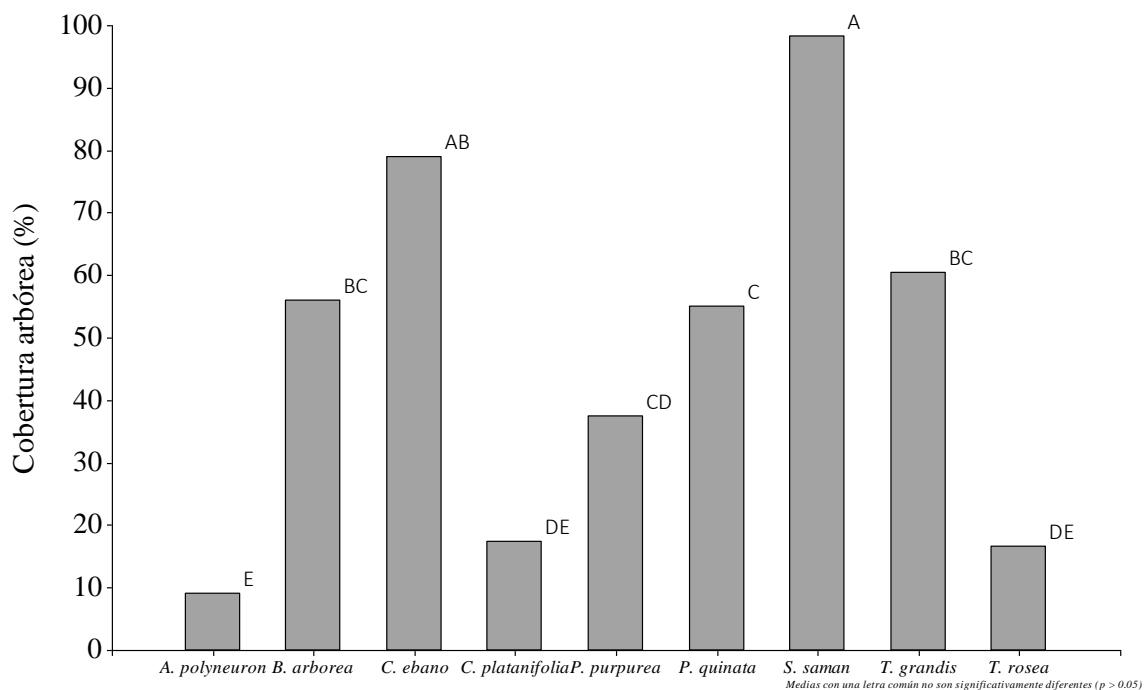
Con respecto al carbono aéreo acumulado, se observa una relación positiva entre la edad y el carbono durante la etapa juvenil (3 a 49 meses de edad) y a medida que se avanza en el tiempo las diferencias entre especies aumentan. Los resultados del análisis de varianza realizado a los 49 meses de edad, sugieren que hay diferencia en la cantidad de carbono aéreo acumulado entre las especies ( $p < 0.0001$ ). Las especies con mayor acumulación de carbono fueron *S. saman* (0.057 t), *T. grandis* (0.051 t) y *C. platanifolia* (0.051 t). Las demás especies presentaron valores por debajo de 0.021 (t) de carbono en el tiempo 49 (Figura 7).



**Figura 7.** Curvas del carbono aéreo acumulado por las especies en etapa juvenil

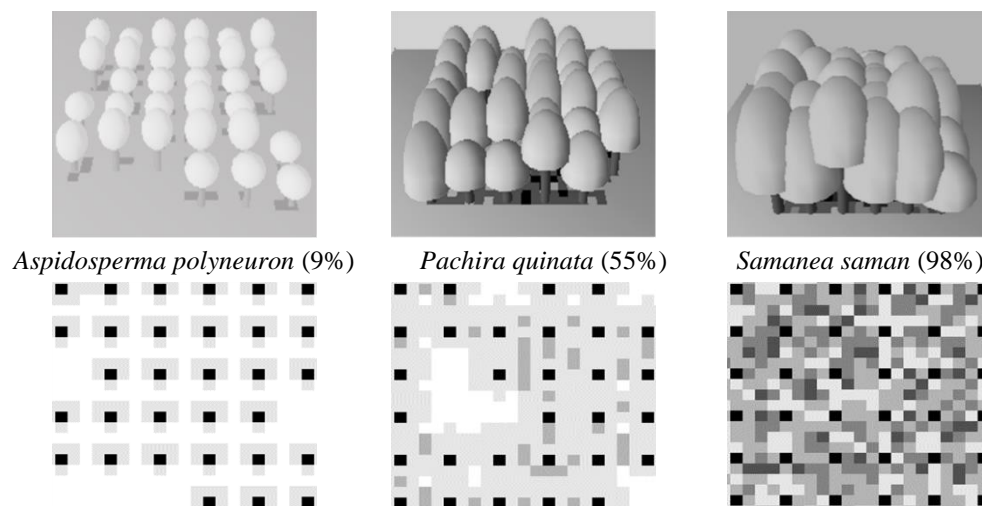
### 3.4.3. Cobertura arbórea

Los resultados del análisis de varianza realizado a los 49 meses de edad, sugieren que hay diferencia del porcentaje de cobertura arbórea entre las especies ( $p < 0.0001$ ). Las especies que aportaron mayor cobertura arbórea fueron *S. saman* (98.23%) y *C. ebano* (79%): Las especies con menor aporte de cobertura arbórea fueron *A. polyneuron* (9.01%), *T. rosea* (16.6%) y *C. platanifolia* (17.3%). Las demás especies estuvieron en el rango de 37.5% a 60.5%, lo que significa que son similares (Figura 8).



**Figura 8.** Cobertura arbórea de las especies a los 49 meses de edad

Las simulaciones con *ShadeMotion* mostraron el comportamiento de la cobertura arbórea de las especies en etapa juvenil. La especie con menor intensidad de cobertura fue *A. polyneuron* (9.1%) y la especie con mayor intensidad fue *S. saman* (98%) representada por los espacios con mayor saturación de color en escala de grises (Figura 9).



**Figura 9.** Representación de la cobertura arbórea en tercera dimensión y la parcela para las especies *A. polyneuron*, *P. quinata* y *S. saman*. Los cuadros negros corresponden a la ubicación de los árboles y los colores grises representan la sombra en cada punto

### 3.5. Discusión

El comportamiento de las especies forestales en cuanto a crecimiento y producción maderable presentó diferencias entre las especies evaluadas en esta investigación, lo que permite clasificarlas, por ejemplo, teniendo en cuenta la celeridad del crecimiento como una de sus características funcionales en dos grupos; (i) especies adquisitivas o de rápido crecimiento y (ii) especies conservativas o de crecimiento lento (Villar Montero et al. 2008). En el primer grupo con las especies *Tectona grandis*, *Samanea saman*, *Cavanillesia platanifolia*, *Pachira quinata* y *Tabebuia rosea* como especies de rápido crecimiento en altura y DAP y un segundo grupo con las especies *Aspidosperma polyneuron*, *Bulnesia arborea*, *Caesalpinia ebano* y *Peltogyne purpurea* como especies de crecimiento lento con mayores densidades de la madera y menor producción forestal. De acuerdo a (Vásquez-Valderrama and Solorza-Bejarano 2018) los rasgos funcionales de las especies forestales constituyen un factor importante a tener en cuenta para la selección de especies y su incorporación procesos de restauración ecológica, las especies conservativas se recomiendan en estos casos, debido a que su desarrollo es lento y se da en largo plazo generando más estabilidad a los mecanismos ecológicos.

La especie *T. grandis* tuvo el mejor desempeño en las variables evaluadas. Salcedo Pérez et al. (2019) reportaron árboles de *T. grandis* de 6 años de edad con altura total promedio de 12 m y DAP promedio de 14 cm, Fernández-Solís (2018) encontró arboles de *T. grandis* de 5 años de edad con altura total promedio de 13.36 m y DAP promedio de 16.13 cm, (Tamarit Urías et al. 2014) reportaron árboles de *T. grandis* con un DAP de 17.5 cm, altura total de 14 m y un volumen comercial de 0.137 m<sup>3</sup>, lo cual fue similar con el volumen de 0.147 m<sup>3</sup>, la altura total promedio de 14.3 m y DAP promedio de 19.79 cm que presentaron los árboles en este estudio. Así, el crecimiento de Teca en el experimento fue similar al de una plantación comercial. Sin embargo, la implementación de SAF con Teca están limitados a las condiciones edafoclimáticas de la región en la que se desee incorporar, en nuestro caso específico, el bosque seco tropical de la región Caribe colombiana, no es recomendable la implementación de Teca debido a que es una especie introducida de la cual se han documentado los efectos negativos en la implementación en sistemas productivos, de acuerdo a Burniske et al. (2013) reportaron en la parte más seca de Costa Rica, que la teca tiene altas tasas de transpiración haciendo que haya menos disponibilidad agua y la producción de los cultivos circundantes puede afectarse debido a que se reduce la población de abejas polinizadoras.

La especie *A. polyneuron* fue la que tuvo el menor desempeño en las variables evaluadas comparado con las demás especies. Ramalho de Carvalho (2004) reportó para *A. polyneuron* una altura total promedio de 3.13 m en árboles de 6 años de edad bajo un marco de plantación de 5 m × 2 m, lo cual resultó coherente con los 3.8 m de altura que obtuvieron los árboles a la edad de 4 años en este experimento. Sin embargo, existen limitaciones para la incorporación de las especies con crecimiento lento en SAF para el posterior aprovechamiento maderable, debido a que son especies en peligro de extinción por sobre aprovechamiento y hacen parte de la fauna del bosque seco tropical colombiano. De acuerdo a Fajardo et al. (2013) se conoce poco sobre el bosque seco tropical y se ha catalogado como el bosque más fragmentado y degradado en Colombia. La promoción de estas especies para su integración en fincas de productores de la

región es deseable por medio de la inclusión en SAF para la prestación de otro tipo de servicios, como la conservación del material genético de estas especies amenazadas, la preservación de la flora y la fauna asociada a estas especies y la mitigación del cambio climático. El Gobierno de Colombia como estrategia para motivar a los productores a utilizar especies forestales de las cuales no van a poder aprovechar la madera a futuro, mediante la entrega de incentivos económicos a quienes presten servicios ambientales que promuevan la preservación o restauración de ecosistemas ambiental y socialmente estratégicos, por medio de acciones, como por ejemplo, conservar el bosque y/o conservar una cuenca hídrica (MADS 2018).

El diseño de SAF depende del conocimiento de la cantidad de sombra o cobertura arbórea que cada especie forestal pueda aportar a un sistema productivo (Somarriba 2002). Los pastos con vocación ganadera toleran hasta el 20% de sombra (Obispo et al. 2008), el cultivo de café tolera de un 35% a un 45% de sombra (Farfan y Jaramillo 2013) y el cultivo de cacao requiere del 25 al 30% de sombra (Avila et al. 2013). Teniendo en cuenta las afirmaciones anteriores, es posible indicar que podrían integrarse en los sistemas silvopastoriles las especies *A. polyneuron*, *C. platanifolia* y *T. rosea* debido a que poseen menos del 20% de cobertura arbórea. Las demás especies presentaron porcentajes de sombra superiores al 30% en esta investigación, con lo que podrán integrarse en SAF pero teniendo en cuenta el manejo agronómico, la edad de los árboles, la cantidad de árboles por hectárea, los raleos, la frecuencia de poda para que sean compatibles con los cultivos y las bondades que se desean obtener con la sombra como la regulación del microclima, control de arvenses de manera sostenible, control de la erosión hídrica y eólica, etc.

Conocer la intensidad del sombreado y el traslape de las copas de los árboles, permite realizar asociaciones de varios estratos (Tobar López e Ibrahim 2008). De acuerdo a esta afirmación, las especies forestales se establecieron bajo un esquema de plantación comercial, con árboles sembrados a una distancia de 3.5 m × 3.5 m, a una densidad inicial de 816 árboles ha<sup>-1</sup>. Las recomendaciones generadas en este escrito son para el nicho ecológico del Caribe colombiano, en las especies evaluadas, a una edad de 4 años y con el marco de plantación evaluado. Es posible combinar las especies en la medida en que se realicen prácticas sencillas como bajar la densidad de siembra para disminuir el número de árboles ha<sup>-1</sup> y de esta manera disminuir el aporte de cobertura arbórea de cada especie forestal para su integración en SAF.

Las especies *S. saman* y *C. platanifolia* tuvieron la mayor producción de carbono aéreo acumulado en su etapa juvenil (3 a 49 meses de edad), lo que puede significar que a futuro podrán almacenar más carbono. De acuerdo al Gobierno de Colombia, estas especies podrán incorporarse en el Plan de Gestión Integral del Cambio Climático de la región Caribe (MADS 2016) a través de los incentivos económicos, como por ejemplo, promoviendo la extinción de impuestos a empresarios que permitan dar cumplimiento a los compromisos nacionales sobre la reducción de la huella de carbono y de emisiones de carbono producto de la actividad productiva. Lo anterior promoverá el uso racional de los recursos naturales y la adaptación al cambio climático de la región.

El manejo y aprovechamiento de los SAF depende del conocimiento de las tasas de crecimiento y la producción forestal expresada en volumen maderable (Detlefsen y Somarriba

2012). Las especies forestales maderables pueden integrarse en sistemas agroforestales con base en lo indicado por De Freitas Costa et al. (2018), y son una alternativa rentable porque se puede diversificar el área de cultivo por medio de la producción de madera y un sistema agropecuario. Por ejemplo, la madera de *P. quinata* es de gran valor comercial en la región por sus atributos de durabilidad, resistencia y color. Además, obtener el material vegetal es sencillo en la región Caribe de Colombia (Ramírez Gómez et al. 2018).

De acuerdo a Andrade-Erazo et al. (2019) en la región Caribe colombiana existen experiencias de socios agroforestales en fincas productoras de palma amarga (*Sabal mauritiiformis*) con *T. rosea*. También hay experiencias con *T. grandis* en asocio con frutales como el copoazu (*Theobroma grandiflorum*) (Carneiro Guerra-Costa et al. 2018), mango (*Mangifera indica*), guayaba (*Psidium guajava*) y cultivos como maíz (*Zea mays*), menta (*Mentha piperita*) y pimienta (*Piper nigrum*) (Kumar Maurya 2018). Fitriani et al. (2018) al asociar café (*Coffea arabica*) a una densidad de 1,719 árboles ha<sup>-1</sup> con árboles multipropósito a una densidad de 182 árboles ha<sup>-1</sup> reportaron un incremento de la productividad: Baez Daza (2018) también demostró que se favorece la fijación de nutrientes en el suelo e indicó un aporte de 1.253 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de hojarasca de *T. grandis* que se reflejó en 38.2 kg ha<sup>-1</sup> de nitrógeno, 1.5 kg ha<sup>-1</sup> de fósforo y 32.1 kg ha<sup>-1</sup> de K. La transformación de esta hojarasca en nutrientes debe al desarrollo de biomasa microbiana en el suelo que favorece la mineralización de la materia orgánica como lo menciona Oli et al. (2018), quienes encontraron una relación carbono:nitrógeno (C:N) de 12.2 en la hojarasca. Desde el punto de vista de la conservación *T. grandis* es beneficiosa para la fauna de mamíferos como se evidenció en un estudio que encontró al tapir (*Tapirus bairdii*) habitando dentro de plantaciones de cinco años de edad (Brandt y Singleton 2018).

Las bondades de *S. saman* como leguminosa, hacen que la incorporación de esta especie en SAF pueda ser usada como un suplemento alimenticio para animales. De acuerdo a los reportes de Oduguwa et al. (2000) es posible alimentar conejos (*Oryctolagus cuniculus*), Jetana (2018) indicó que se pueden alimentar el búfalo tailandés (*Bubalus arnee*), Pasquel Corral (2019) encontró una reducción en los costos de producción al alimentar tilapia (*Oreochromis sp.*). Triana González et al. (2018) reportaron un incremento en la producción ganadera de bovinos (*Bos taurus*) al implementar sistemas silvopastoriles con árboles de *S. saman* a una densidad de 10 m × 10 m; así mismo, Ramos Moura et al. (2018) reportaron el aumento de la eficiencia ecofisiológica del pasto (*Brachiaria decumbens*) al asociarlo con *S. saman* comparado con el sistema tradicional de pastoreo (sin árboles). También se ha evidenciado la nodulación de rizobios en las raíces de *S. saman*, convirtiéndose en un indicador de remediación del suelo por el beneficio de la retención del carbono y aumento en la productividad agrícola al ser fijadora de nitrógeno (Mahmood y Athar 2018). También puede usarse en espacios urbanos debido a que posee un elevado índice de tolerancia a la contaminación del aire de acuerdo a Sumangala et al. (2018).

Las especies *A. polyneuron*, *B. alborea* y *P. purpurea* son especies amenazadas, en peligro de extinción, por lo que deben emplearse en sistemas silvoagrícolas para la conservación. (Godoy-Veiga et al. 2018) proponen usar *A. polyneuron* en cercas vivas y al borde del bosque;



Gómez Gamarra (2018) propone la siembra en los bordes de las carreteras a lo largo de la costa Caribe colombiana, abarcando todos los departamentos que la conforman: Atlántico, Bolívar, Cesar, Córdoba, Magdalena, Sucre y La Guajira con *B. arborea* ya que en esta región se encuentra su principal nicho. La especie *A. polyneuron* puede ser usada en asocio con especies de importancia cultural como *S. mauritiiformis*, cuyas hojas son utilizadas para realizar los techos de las viviendas en el departamento del Atlántico en Colombia (Andrade-Erazo et al. 2019) o en sistema agroforestal con hierba mate (Montagnini et al. 2013). También la especie *P. purpurea* es fuente de alimento para murciélagos polinizadores e insectos esfíngidos (USDA 2010), por tanto su siembra podría contribuir a mantener poblaciones de estos polinizadores y mejorar la prestación del servicio de polinización a cultivos circundantes También es beneficioso para el suelo porque pierde sus hojas hasta en un 50% en temporada de sequía, y por ser una leguminosa aporta nitrógeno y contribuye a la mineralización de la materia orgánica, (Vílchez-Alvarado y Rocha 2004).

La especie *C. platanifolia* puede usarse para la conservación ecológica, ya que sirve de hospedero para especies endémicas como el loro amazona de lores rojas (*Amazona lilacina*) de acuerdo a Solís Ponce (2018); asimismo, es una especie que tiene un aporte considerable de materia orgánica debido a la hojarasca que produce en las épocas secas y se le ha encontrado en SAF como árboles dispersos (González Pacheco 2018). También es una especie con alto valor cultural, de acuerdo con Pasquini et al. (2018) las semillas son consumidas por las comunidades afrodescendientes del Caribe colombiano y el premio nobel de literatura Gabriel García Márquez menciona este árbol “Macondo” como un ícono en sus novelas.

La especie *T. rosea* puede usarse para la conservación de otras especies, como plantas epífitas vasculares que se encuentran en la zona de reserva del parque Nacional Natural Paramillo en Córdoba, Colombia (Ruiz Vega et al. 2015). Así mismo, puede usarse como recreación en su época de floración, tal como lo reporta (Arévalo et al. 2018) para la especie *Tabebuia crysantha* que se ha convertido en una atracción turística cuando están en floración por la belleza de sus flores amarillas y la ausencia de hojas durante la temporada seca en Mangahurco, Ecuador; por último, las comunidades costeras en Venezuela utilizan el tallo de *B. arborea* y *T. rosea* para realizar artesanías (Castro et al. 2018).

### **3.6. Conclusiones**

Las especies con mayor producción forestal expresado en volumen maderable y mayor carbono aéreo acumulado en etapa juvenil (49 meses de edad) fueron *S. saman*, *T. grandis* y *C. platanifolia*, indicando que estas especies pueden utilizarse en plantaciones forestales para la producción de madera y/o producción de carbono aéreo, su uso potencial está dirigido hacia la industria debido a que son especies con buena adaptación para el Caribe colombiano y que no están en peligro de extinción o amenaza. También se pueden usar estas especies en proyectos que contemplen el pago por servicios ambientales como parte de las políticas de responsabilidad social empresarial.

Las especies que presentaron menor producción forestal y que coinciden por presentar estado de vulnerabilidad y amenaza de peligro de extinción fueron *A. polyneuron*, *B. arborea*, *C. ebano* y *P. purpurea*, por lo que deben emplearse en espacios urbanos o en asocio con sistemas agroforestales dirigidos a la conservación del bosque seco tropical, debido a que proveen de servicios eco sistémicos a la fauna y aumentan las reservas de carbono.

La tasa de crecimiento de las nueve especies forestales evaluadas) permitió conocer el comportamiento de la altura total y del diámetro a la altura del pecho de las especies en etapa juvenil (3 a 49 meses de edad) para el nicho específico de la región Caribe colombiana; sin embargo, para la incorporación futura de estas especies en sistemas agroforestales se deben realizar experimentaciones en asocio con cultivos de la región que permitan hacer aproximaciones de diversificación agrícola a pequeña escala.

La cobertura arbórea aportada por las especies forestales permitió ubicarlas en un determinado sistema agroforestal utilizando una densidad de las especies evaluadas de 816 árboles ha<sup>-1</sup> (3.5 m × 3.5 m) a los cuatro años de edad. Las especies *A. polyneuron*, *T. rosea* y *C. platanifolia* pueden asociarse con pastos, *P. purpurea* con café y las demás especies pueden manejarse agrónomicamente para ser integradas en sistemas agroforestales.

### **Recomendaciones**

Dar continuidad al registro de variables para poder realizar la secuencia del comportamiento de las nueve especies forestales en edades posteriores a los 49 meses de edad. Se propone se pueda realizar con una frecuencia de cinco años, es decir, realizar el próximo reporte a los 10, 15 y 20 años de edad de los árboles.

Ubicar árboles dispersos o solitarios de las nueve especies forestales que se encuentren en su hábitat natural para poder obtener la información de los atributos de sus copas (tamaño, oclusión, forma, diámetro) y realizar las comparaciones de la cobertura arbórea con los árboles del presente estudio. Así se profundizará el conocimiento previo del comportamiento de estas especies en estado natural para realizar a futuro los diseños de los SAF para la región Caribe colombiana.

De la especie *C. ebano* hay poca información con respecto a su cultivo y uso en SAF, por lo que se recomienda realizar estudios de biología e identificación de usos potenciales en la región Caribe colombiana.

Diseñar sistemas agroforestales con la información obtenida en este estudio para obtener resultados previos que faciliten la adopción temprana del uso de estas especies en SAF por parte de los agricultores.

### 3.7. Referencias

- Aalde H et al. Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra, Capitulo 4. Tierras forestales. In: Eggleston S, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K (eds) 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, Japón, 2006. Institute for Global Environmental Strategies Hayama, Japan,
- Agrosavia (Corporación colombiana de investigación agropecuaria, Colombia) (2015) Ubicación de los centros de investigación en Colombia.
- Akaike H (1974) A new look at the statistical identification model IEEE Transactions on Automatic Control 6: 716–723
- Alamgir M, Turton SM, Macgregor CJ, Pert PL (2016) Assessing regulating and provisioning ecosystem services in a contrasting tropical forest landscape. *Ecological Indicators* 64:319-334 doi:10.1016/J.ECOLIND.2016.01.016
- Amaral D, Zaú AS, Gama DC, Albuquerque E, Silva FJ (2018) Aproveitamento de resíduo madeireiro em um município Amazônico *Biodiversidade* 17:22-33
- Andrade-Eraza V, García N, Raz L, Leonel H, Galeano G (2019) Integration and management of bitter palm (*Sabal mauritiiformis*, Arecaceae) in agroforestry systems in the Caribbean region of Colombia *Caldasia* 41:92-107
- Arévalo A, Ávalos L, Arévalo P, Espinoza M (2018) Estilos fotográficos aplicados en la creación de un fotolibro sobre el florecimiento del guayacán en Mangahurco provincia de Loja Chakiñan, *Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*:106-117
- Avila A, Campos M, Guharay F, Camacho A (2013) Aprendiendo e innovando sobre la poda de cacao y el maenjo de árboles acompañantes en sistemas agroforestales: Guía no. 5. Lutheran World Relief,
- Bach O (2011) Decimoséptimo informe Estado de la Nación (2010) Agricultura, Agroforestería y Cambio Climático Informe final Investigador. Costa Rica
- Baez Daza E (2018) Producción y aporte de nutrientes en la hojarasca de las especies abarco (*Cariniana piryformis* M), teca (*Tectona grandis* Lf) y cacao (*Theobroma cacao* L.) en un sistema agroforestal en los municipios de Rionegro, Santander y Muzo, Boyacá
- Balzarini M, Di Rienzo J, Tablada M, Gonzalez L, Bruno C, Córdoba M, Casanoves F (2015) Estadística y Biometría. Ilustraciones del uso de Infostat en problemas de agronomía. Universidad Nacional de Córdoba, 2 edn. Brujas, Argentina
- Banco Mundial, Estados Unidos, CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical, Colombia), CATIE Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Costa Rica) (2015) Agricultura Climáticamente Inteligente en Colombia. 2 ed, Washington DC, Grupo Banco Mundial:12 p
- Barros-Maestre A, Granados C (2016) Relaciones tróficas de dos lagunas en áreas de rehabilitación dentro del complejo carbonífero del Cerrejón, La Guajira–Colombia. *Revista Intertropica* 11:57-66
- Bellow J, Nair P (2003) Comparing common methods for assessing understory light availability in shaded-perennial agroforestry systems *Agricultural and forest meteorology* 114:197-211

- Biogeoco (Biodiversidad, Geografía y Ecología, Colombia) (2016) Estudio de impacto ambiental de las actividades de extracción de aceite de palma de la organización Extractora el Roble S.A.S. (Versión 2). Santa Marta, Colombia
- Bölöni J, Molnár Z, Biró M, Horváth F (2008) Distribution of the (semi-) natural habitats in Hungary II. Woodlands and shrublands. *Acta Botanica Hungarica* 50 107-148  
doi:10.1556/ABot.50.2008.Suppl.5
- Brandt LS, Singleton M (2018) Record of Baird's tapir *Tapirus bairdii* at the La Suerte Biological Field Station in the Caribbean lowlands of Costa Rica. *PeerJ Preprints*,
- Broschat TK, Burch D (2013) How to Minimize Wind Damage in the South Florida Landscape. University of Florida, IFAS:5 p
- Brown S (ed) (1997a) Appendix 1 - List of wood densities for tree species from tropical America, Africa, and Asia. *Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: a Primer*. (FAO Forestry Paper - 134. FAO, Illinois, USA
- Brown S (1997b) *Estimating biomass and biomass change of tropical forests : a primer* vol 134. FAO Forestry Paper, no. 134, Rome, Italy
- Burkhard B, Maes J (2017) *Mapping Ecosystem Services*. vol 1. Pensoft Publishers, Bulgaria. doi:<https://doi.org/10.3897/ab.e12837>
- Burniske G, Abelleira O, Galbraith S, A. Bosque Pérez N, Fremier A, Günter S, Ordonez J (2013) Provision of Environmental Services for Food Security vs Financial Benefits of Teak Plantations -What are the Trade-offs?
- Callo-Concha D, Krishnamurthy L, Alegre J Cuantificación del carbono secuestrado por algunos sistemas agroforestales y testigos, en tres pisos ecológicos de la Amazonía del Perú. In: Krishnamurthy L, Gómez MU (eds) *Tecnologías agroforestales para el desarrollo rural sostenible*, Mexico, 2002. PNUMA, Oficina Regional para América Latina y el Caribe, pp 159-182
- Cárdenas López D, Salinas NR, (eds.) (2007) *Libros rojos de especies amenazadas de Colombia: Especies maderables: primera parte vol 4*. SINCHI; MADS, Bogotá, Colombia
- Carneiro Guerra-Costa K, de Sousa Costa JJ, Quaresma Maneschy R, Fontel Quieroz J (2018) A implantação de sistemas agroflorestais via PRONAF floresta no Sudeste do Pará *Cadernos de Agroecologia* 13
- Casanoves F, Cifuentes Jara M, Chacón León M, (eds.) (2017) *Estimación del carbono a partir de inventarios forestales nacionales: buenas prácticas para la recolección, manejo y análisis de datos*. Serie técnica Informe técnico, no. 410. CATIE, Turrialba, Costa Rica
- Casanoves F, Pla L, Di Rienzo J, (eds.) (2011) *Valoración y análisis de la diversidad funcional y su relación con los servicios ecosistémicos*. Serie técnica Informe Técnico, no. 384. CATIE, Turrialba, Costa Rica
- Castro M, Lastres M, Ruiz-Zapata T, Magallanes A, Araujo E (2018) Plantas utilizadas para la elaboración de artesanías en comunidades costeras de Venezuela *Polibotánica*:305-325
- CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Costa Rica) (2016) *ShadeMotion*.

- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe , Chile), NU (Naciones Unidas, Chile) (2018) Agenda 2030 y los objetivos de desarrollo sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile,
- Congreso de Colombia (2014) Ley no. 1731 del 31 de julio de 2014. Colombia
- Congreso de Colombia (2016) Ley no. 1819 del 29 de diciembre de 2016 Colombia
- Congreso de Colombia (2017) Ley no. 1876 del 29 diciembre de 2017 Colombia
- Corpoica (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Colombia) (2017a) Balance Social., 1 edn. Corpoica, Mosquera, Colombia
- Corpoica (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Colombia) (2017b) Corpoica en alianza con el CATIE, ofrecerá becas para maestrías en investigación. Mosquera
- Chave J (2005) Medición de la altura del árbol, para árboles tropicales. Toulouse, France
- Danaher J, Fatal J, Letourneau J, McMahon M (2016) Developing an Agro-ecotourism Route in Copey de Dota. en línea, sitio web, Worcester Polytechnic Institute
- De Carvalho VM, Marques RM, Lapenta AS, Machado MdF (2003) Functional classification of esterases from leaves of *Aspidosperma polyneuron* M. Arg.(Apocynaceae). *Genetics and molecular biology* 26:195-198
- De Freitas Costa MC, Da Silva Oliveira GB, Maia E, Evaristo AdP (2018) Aspectos florísticos e fitossociológicos de um sistema agroflorestral de base agroecológica de Cacoal, Rondônia *Cadernos de Agroecologia* 13
- De Sousa K, van Zonneveld M, Imbach P, Casanoves F, Kindt R, Ordonez JC (2017) Suitability of key Central American agroforestry species under future climates: an Atlas. Occasional Paper no 26, Turrialba, Costa Rica, CGIAR:257 p
- Detlefsen G, Marmillod D, Scheelje M, Ibrahim M (2012) Protocolo para la instalación de parcelas permanentes de medición de la Producción maderable en sistemas agroforestales de Centroamérica. Serie técnica Manual técnico, no. 107. CATIE, Turrialba, Costa Rica
- Detlefsen G, Somarriba E (2012) Producción de madera en sistemas agroforestales de Centroamérica. Serie técnica Manual técnico, no. 109. CATIE, Turrialba, Costa Rica
- Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG, Gonzalez L, Tablada M, Robledo CW (2018) Infostat. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina
- Di Rienzo JA, Casanoves F, González LA, Tablada EM, Díaz MdP (2008) Estadística para las ciencias agropecuarias. vol 630.21 E79e. Córdoba, AR: Edit. Brujas,
- Di Rienzo JA, Guzmán AW, Casanoves F (2002) A multiple-comparisons method based on the distribution of the root node distance of a binary tree *Journal of agricultural, biological, and environmental statistics* 7:129-142
- Di Rienzo JA, Macchiavelli RE, Casanoves F (2011) Modelos lineales mixtos: aplicaciones en InfoStat Grupo Infostat, Córdoba 193

- Díaz S, Cabido M (2001) Vive la différence: plant functional diversity matters to ecosystem processes: plant functional diversity matters to ecosystem processes. *Trends in ecology and evolution* 16:646-655
- Dinesh D, Campbell B, Bonilla-Findji O, Richards M, (eds.) (2017) 10 best bet innovations for adaptation in agriculture: a supplement to the UNFCCC NAP Technical Guidelines. CGIAR, Wageningen, The Netherlands
- Dos Santos Mamede JS, Pasa MC (2018) Os Quintais Agroflorestais na Comunidade Rural em Várzea Grande, Mato Grosso, Brasil *Biodiversidade* 17:54-70
- Ecoagricultor (2018) Día mundial del agua 2018: situación actual, perspectivas y buenas prácticas. Naturvegan Ecologico, Gipuzkoa, España
- EEA (European Environment Agency, Dinamarca) (2018) The Common International Classification of Ecosystem Services (CICES). Copenhagen, Dinamarca
- Eggleston S, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K (2006) 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories vol 5. Institute for Global Environmental Strategies Hayama, Japan,
- Fajardo L, Lovera M, Arrindell P, Aguilar VH, Hasmy Z, Cuenca G (2015) Morphotype-based characterization of arbuscular mycorrhizal fungal communities in a restored tropical dry forest, margarita island-venezuela *Revista de Biología Tropical* 63:859-870
- Fajardo L, Rodríguez J, González V, Briceño-Linares J (2013) Restoration of a degraded tropical dry forest in Macanao, Venezuela *Journal of Arid Environments* 88:236-243
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations, Italy) (2013) Climate-smart Agriculture, Sourcebook. Roma, Italia
- Farfan F, Jaramillo A (2013) Sombrío para el cultivo del café según la nubosidad de la región.
- Fernández-Solís JD (2018) Modelaje de parámetros de albura y duramen en árboles de *Tectona grandis* Lf en plantaciones forestales de distintas edades en Costa Rica
- Fisher RA (1937) *The design of experiments*. Oliver And Boyd; Edinburgh; London,
- Fitriani F, Arifin B, Zakaria WA, Ismono H, Hilmanto R (2018) Coffee Agro forestry Performance in Pulau Pangung Sub-district, Tanggamus, Lampung, Indonesia *Pelita Perkebunan (a Coffee and Cocoa Research Journal)* 34:69-79
- Florián Buitrago M, Pabón Restrepo G, Pérez Álvarez PA, Rojas Laserna M, Suárez Castaño R, (eds.) (2017) Política Nacional de cambio climático de Colombia: documento para tomadores de decisiones. MADS, Bogotá, Colombia
- Fundación Aquae (2018) ¿Cuánta agua potable hay en la tierra? | Infografía. Madrid, España
- García DE, Medina MG, Moratinos P, Torres A, Cova LJ, Perdomo D (2009) Potencial forrajero para cabras de veinte especies leñosas en el estado Trujillo, Venezuela. *Zootecnia tropical* 27:221-232
- Geertsema W et al. (2016) Actionable knowledge for ecological intensification of agriculture. *Frontiers in Ecology and the Environment* 14:209-216 doi:10.1002/fee.1258

- GlobAllomeTree (2018) Assessing volume, biomass and carbon stocks of trees and forests.
- Godoy-Veiga M, Ceccantini G, Pitsch P, Krottenthaler S, Anhuf D, Locosselli GM (2018) Shadows of the edge effects for tropical emergent trees: the impact of lianas on the growth of *Aspidosperma polyneuron* *Trees* 32:1073-1082
- Gómez Gamarra AP (2018) Sinopsis taxonómica y modelamiento de nicho de la familia Zygophyllaceae r. Br. para Colombia y su relación con el bosque seco tropical
- González Pacheco AE (2018) Identificación de especies vegetales características del ecosistema “bosque seco” para su preservación en “el oro”. en línea, sitio web, Universidad Técnica de Machala
- Gordon LJ, Finlayson CM, Falkenmark M (2010) Managing water in agriculture for food production and other ecosystem services. *Agricultural Water Management* 97:512-519 doi:10.1016/j.agwat.2009.03.017
- Gualdrón Acosta R (2011) Cerrejón : hacia la rehabilitación de las tierras intervenidas por la minería a cielo abierto. Panamericana formas e impresos SA, Bogotá, Colombia
- Guerra-De la Cruz V, Galicia L (2017) Tropical and highland temperate forest plantations in Mexico: pathways for climate change mitigation and ecosystem services delivery. *Forest* 8:14 doi:10.3390/f8120489
- Hannah L et al. (2017) Regional modeling of climate change impacts on smallholder agriculture and ecosystems in Central America *Climatic Change* 141:29-45 doi:10.1007/s10584-016-1867-y
- Hije L, Sujii ER, Nava-Camberos U (eds) (2017) Integrated Pest Management in Tropical Vegetable Crops. *Integrated Pest Management in Tropical Regions*, CAB International edn, Boston, Estados Unidos
- Holguín VA, García II, Mora-Delgado J (2018) Árboles y arbustos para silvopasturas : uso, calidad y alometría Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia
- Ibrahim M et al. (2003) Contribución de las cercas vivas a la productividad e integridad ecológica de los paisajes agrícolas en América Central. *Agroforestería de las Américas* 10:30-39
- IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Colombia) (2011) Sistemas agroforestales y restauración ecológica como medidas de adaptación al cambio climático en alta montaña: caso piloto proyecto Nacional de adaptación al cambio climático-INAP-componente B. Bogotá, Colombia
- ITTO (International Tropical Timber Organization, Japan) (2016) Biennial review and assessment of the world timber situation 2015-2016. Yokohama, Japan
- ITTO (International Tropical Timber Organization, Japan) (2017) Annual Report 2016. Yokohama
- Jetana T (2018) Rain tree pod (*Samanea saman*), the miracle feed for ruminants *Thai J Vet Med* 48:139-141
- Keenleyside K, Dudley N, Cairns S (2014) Restauración ecológica para áreas protegidas, principios, directrices y buenas prácticas. UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza), Gland, Suiza

- Kodithuwakku U, Edussuriya M (2018) Jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) and teak (*Tectona grandis* L.) leaf extracts as green corrosion inhibitors *Ruhuna Journal of Science* 9:215-224
- Kumar Maurya M (2018) Survey of Existing Agroforestry Systems and Identify Different Fruit/ Forest Crops Grown Under Agroforestry in Selected Villages of Baldirai Block in Sultanpur District vol 6. doi:10.18782/2320-7051.7038
- Lipper L et al. (2014) Climate-smart agriculture for food security *Nature Climate Change* 4:1068
- Lüke A, Hack J (2017) Modelling Hydrological Ecosystem Services – A state of the art model comparison. *Hydrology and Earth System Science*:29 doi:<https://doi.org/10.5194/hess-2017-436>
- MADS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia) (2012a) Construcción colectiva de la Estrategia Nacional REDD+. Bogotá, Colombia
- MADS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia) (2012b) Política Nacional para la gestión integral de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos (PNGIBSE). Bogotá, Colombia
- MADS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia) (2014) Resolución no. 0192 de 2014 sobre categorías de amenaza en Colombia. Bogotá, Colombia
- MADS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia) (2015) Plan Nacional de restauración: restauración ecológica, rehabilitación y recuperación de áreas disturbadas. Bogotá, Colombia
- MADS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia) (2016) Plan integral de gestión del cambio climático territorial del departamento de Magdalena 2040. Bogotá, Colombia
- MADS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia) (2017) Estrategia integral de control a la deforestación y gestión de los bosques (EICDGB) vol 1. Bogotá, Colombia
- MADS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia) (2018) Pago por servicios ambientales. Colombia
- Mahmood A, Athar M (2018) Taxonomic Appraisal of Nodulation in the Leguminosae of Pakistan *Planta Daninha* 36
- Manjunatha M, Niveditha M, Santhoshkumar A, Kunhamu T (eds) (2018) Simulation of carbon dynamics of *Tectona grandis* forest in western ghats of Kerala, India, using century model. *Climate change: challenges and solutions*. Allied Publishers Pvt. LTD., India
- Mapsofworld (2011) Ubicación de Colombia en el mapa del mundo.
- Mark J, Newton AC, Oldfield S, Rivers M (2014) The international timber trade: a working list of commercial timber tree species.
- Martínez-Salinas A, DeClerck F, Vierling K, Vierling L, Legal L, Vílchez-Mendoza S, Avelino J (2016) Bird functional diversity supports pest control services in a Costa Rican coffee farm. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 235:277-288 doi:10.1016/j.agee.2016.10.029
- Medina MG, García DE, Cova LJ, Soca M, Domínguez CE, Baldizán A, Pizzani P (2008) Preferencia de rumiantes por el follaje de árboles, arbustos y herbáceas en la zona baja del estado Trujillo. *Zootecnia Tropical* 26:5



- Meli P, Carrasco-Carballido V (2011) Restauración ecológica de riberas Manual para la recuperación de la vegetación ribereña en arroyos de la Selva Lacandona:66
- MinHacienda (Ministerio de Hacienda y Crédito Público, Colombia) (2017) Decreto 926 del 01 de junio de 2017. Colombia
- Montagnini F, Ibrahim M, Murgueitio E (2013) Silvopastoral systems and climate change mitigation in Latin America. *Bois et Forets des Tropiques* 67:3-16
- Montagnini F, Somarriba E, Murgueitio E, Fassola H, Eibl B, (eds.) (2015) Sistemas Agroforestales. Funciones Productivas, Socioeconómicas y Ambientales. Serie técnica Informe Técnico, no. 402, 1 edn. CATIE; CIPAV, Colombia
- Moreno RD, Villota EN, Gutierrez E, Zúniga JK, Trujillo JF, Montes A (2016) Resultados del proyecto fortalecimiento al pacto intersectorial por la madera legal en Colombia. Gráficas B edn., Pereira, Colombia
- Mulford Soto D (2018) La Corporación colombiana de investigación agropecuaria protege cinco especies maderables en peligro de extinción. *Noticias Agrosavia*, Sevilla, Colombia; 19 jul
- Müller A, Sukhdev P, Miller D, Sharma K, Hussain S (2015) TEEB for agriculture and food: towards a global study on the economics of eco-agri-food systems. *The Economics of Ecosystems and Biodiversity*:20
- Muschler RG (ed) (2016) Agroforestry: essential for sustainable and climate-smart land use? *Tropical Forestry Handbook*, 2 edn, Springer, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-41554-8\_300-1
- Nair PR (1993) An introduction to agroforestry. Springer Science & Business Media, Netherlands
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, United States of America) (2018) Global Greenhouse Gas Reference Network Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division
- Obispo NE, Espinoza Y, Gil JL, Ovalles F, Rodríguez MF (2008) Efecto del sombreado sobre la producción y calidad del pasto guinea (*Panicum maximun*) en un sistema silvopastoril *Zootecnia tropical* 26:285-288
- Oduguwa O, Fanimu A, Onyekwere E, Oyenuga A, Sobogun G (2000) Utilisation of raw and autoclaved whole pods of *Samanea saman* (Jacq Merrill) by the domestic rabbit *Tropical agriculture* 77:194-198
- Oli PS, Mandal TN, Adhikari U (2018) Effect of Leaf Litter Treatment on Soil Microbial Biomass *Open Journal of Soil Science* 8:175
- Padilla A, Savedra S, Padilla D (2007) Impacto al ecosistema semiárido atribuido a la elaboración de cocuy pecayero en Falcón, Venezuela. *Revista Facultad de Agronomía* 24:158-163
- Palencia LPE, Bernal DCS, Camacho RL (2017) Caracterización de los productos forestales no maderables del bosque seco tropical asociado a las comunidades del Caribe colombiano *Revista Brasileira de Biociências* 15

- Parrado-Roseelli A, Gonzales-M R, García H (2016) Estado actual de la investigación científica publicada sobre los bosques de Colombia. *Biodiversidad en la Práctica, Documentos Humboldt Volumen 1:177-197*
- Pasquel Corral D (2019) Eficiencia Del Saman (Samanea Saman) Como Insumo Para El Engorde Del Híbrido Rojo De Tilapia (*Oreochromis Sp.*).
- Pasquini M, Mendoza J-S, Sánchez-Ospina C (2018) Traditional food plant knowledge and use in three afro-descendant communities in the colombian Caribbean Coast: part I generational differences *Economic Botany:17*
- Pearson T, Walker S, Brown S (2013) Sourcebook for land use, land-use change and forestry projects
- Penman J et al. (2003) Good practice guidance for land use, land-use change and forestry Good practice guidance for land use, land-use change and forestry
- Pereira-Jiménez MF, Mora-Vega NS (2018) Propuesta de espacios ecológicos utilizando un sistema de cosecha de lluvia de los techos de los edificios en el cementerio metropolitano de Pavas. en línea, sitio web, Tecnológico de Costa Rica
- Pizano C, Garcia H, (eds.) (2014) El bosque seco tropical en Colombia. MADS; Instituto Humboldt, Bogotá, Colombia
- Pizano C et al. (2016) El bosque seco tropical en Colombia: Distribución y estado de conservación. In. p 202. doi:10.21068/B001.2015.202
- Pla L, Casanoves F, Di Rienzo J (2011) Quantifying functional biodiversity. Springer Science & Business Media,
- PNNC (Parques Nacionales Naturales de Colombia, ) (2018) Cumplimos 28'918.584 ha. Noticias PNNC, Bogotá, Colombia
- Poveda V, Orozco Aguilar L, Medina C, Cerda Bustillo R, López A (2013) Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de cacao en Waslala, Nicaragua. *Agroforestería de las Américas* 49:42-50
- Prodan M, Peters R, Cox F, Real P (1997) Mensura forestal. Serie investigación y educación en desarrollo sostenible, vol 1. Agroamerica, San José, Costa Rica
- Quesada-Álvarez A (2018) Propuesta de modelo de negocio forestal basado en un bosque secundario en el cantón de Turrialba, Cartago, Costa Rica. en línea, sitio web, Instituto Tecnológico de Costa Rica
- Ramalho de Carvalho PE (2004) Peroba-Rosa: *Aspidosperma polyneuron* Embrapa Florestas-Circular Técnica (INFOTECA-E)
- Ramírez Gómez MM, Peñaranda Rolon AM, Pérez Moncada UA, Serralde DP (2018) Biofertilización con hongos formadores de micorrizas arbusculares (hfma) en especies forestales en vivero Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial 16:15-25
- Ramos Moura L, Reis Oliveira F, Catunda Aragão PH, Sousa Santana EH, Torres Netto A (2018) Ecofisiología de *Brachiaria decumbens* em diferentes sistemas de manejo *Revista de Ciências Agrárias* 41:201-210

- Rapidel B et al. (2015) Analysis of ecosystem services trade-offs to design agroecosystems with perennial crops. *Agronomy for Sustainable Development* 35:1373-1390 doi:10.1007/s13593-015-0317-y
- Rodríguez-Ferraro A, Sanz V (2007) Natural history and population status of the yellow-shouldered parrot on la Blanquilla Island, Venezuela. *The Wilson Journal of Ornithology* 119:602-609 doi:10.1676/06-028.1
- Rojas Murcia LE, Carvajal Cogollo JE, Cabrejo, Bello JA (2016) Reptiles from the seasonal dry forest the Caribbean region: distribution of habitat and use of food resource. *Acta Biologica Colombiana* 21:365-377 doi:10.15446/abc.v21n2.49393
- Ruiz Vega R, Esquivel Berrio C, Salgado Cruz A, Saab Ramos H (2015) Catalogo de epifitas vasculares del sector El Silencio (Parque Nacional Natural Paramillo) y zona amortiguadora, Cordoba, Colombia *Acta Biológica Colombiana* 20:167
- Salcedo Pérez E et al. (2019) Propiedades del suelo y nitrógeno como indicadores del crecimiento en plantaciones comerciales de teca *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 10
- Sánchez DA, Pérez P DL, Ortiz G P, Mercado D OA, Moreno M AA, Batista MF, (eds.) (2015) Caracterización biológica y ecológica de las comunidades de plantas acuáticas, plantas terrestres y macroinvertebrados, y caracterización físico-química de aguas de la ventana de estudio de la ciénaga de Zapatos. Instituto Humboldt, Bogotá
- Schwarz G (1978) Estimating the dimension of a model. *Annals of Statistics*, 6 , 461–464.
- Sharma G, Mohanty S, Ray PC, Singh MS, Sarma K, Raju P (2018) Invasion and establishment of the solanum whitefly *Aleurothrixus trachoides* (Back)(Hemiptera: Aleyrodidae) in South India *Current Science* 115:29-31
- Solís Ponce IA (2018) Caracterización del hábitat y uso del mismo por *Amazona lilacina* (Lesson, 1844) en el Bosque Protector Cerro Blanco durante el período 2017-2018. Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Guayaquil
- Somarriba E (1992) Revisiting the past: an essay on agroforestry definition *Agroforestry systems* 19:233-240
- Somarriba E (2002) Estimación visual de la sombra en cacaotales y cafetales. *Agroforestería en las Américas* 9:86-94
- Somarriba E (2009) Planificación agroforestal de fincas. *Materiales de Enseñanza no. 49 Colección de Módulos de Enseñanza Agroforestal, no. 6, 1 edn. CATIE, Turrialba, Costa Rica*
- Sumangala P, Aswath C, Laxman R, Namratha M (2018) Evaluation of Air Pollution Tolerance Index (ATPI) of Selected Ornamental Tree Species of Bengaluru, India *International journal of pure & applied bioscience* 6 (3): 366-37 doi:DOI: <http://dx.doi.org/10.18782/2320-7051.6382>
- Tamarit Urías JC, De los Santos Posadas HM, Aldrete A, Valdez Lazalde JR, Ramírez Maldonado H, Guerra De la Cruz V (2014) Sistema de cubicación para árboles individuales de *Tectona grandis* L. f. mediante funciones compatibles de ahusamiento-volumen *Revista mexicana de ciencias forestales* 5:58-74

- Tantengco OAG, Condes MLC, Estadilla HHT, Ragragio EM, Condes HHT, Estadilla EMR (2018) Ethnobotanical Survey of Medicinal Plants used by Ayta Communities in Dinalupihan, Bataan, Philippines *Pharmacognosy Journal*, 10:859-870 doi:10.5530/pj.2018.5.145
- Tobar López D, Ibrahim M (2008) Valor de los sistemas silvopastoriles para conservar la biodiversidad en fincas y paisajes ganaderos en América Central. Serie técnica Informe técnico, no. 373, 1 edn. CATIE, Turrialba, Costa Rica
- Torquebiau EF (2000) A renewed perspective on agroforestry concepts and classification. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences - Serie III* 323:1009-1017 doi:10.1016/S0764-4469(00)01239-7
- Triana González D, Loyola Hernández O, Tejas Sánchez O, Pompa Rodríguez F (2018) Respuesta animal e impacto económico de la inclusión de árboles en un sistema ganadero *Revista de Producción Animal* 30:35-41
- USDA (United States Department of Agriculture, United States of America) (2010) Manual de Semillas de Árboles Tropicales - Completo.
- Vargas Ríos JO (2011) Restauración ecológica: biodiversidad y conservación. *Acta Biológica Colombiana* 16:221-246
- Vásquez-Valderrama M, Solorza-Bejarano J (2018) Agrupación funcional de especies vegetales para la restauración ecológica de ecosistemas de montaña, Bogotá, Colombia *Colombia Forestal* 21:5-17
- Vélez Agudelo MI, Chavarro Bohórquez DA, Hernández Tasco A, Niño Mendieta AM, Tovar Narváez GE, Montenegro Trujillo IC, (eds.) (2018) Libro Verde 2030. Política Nacional de ciencia e innovación para el desarrollo sostenible. Adoptado mediante Resolución no. 0674 del 9 de julio de 2018. Colciencias, Bogotá, Colombia
- Vergara JA (2015) Caracterización de la degradación y los cambios de usos de suelo en fincas ganaderas y su relación con la diversidad de aves en el Valle del río Cesar, Colombia. en línea, sitio web, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE)
- Vílchez-Alvarado B, Rocha O (2004) Fenología y biología reproductiva del nazareno (*Peltogyne purpurea* Pittier) en un bosque intervenido de la Península de Osa, Costa Rica, América Central *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 1:ág. 47-60
- Villanueva C, Ibrahim M, Casasola F (2008) Valor económico y ecológico de las cercas vivas en fincas y paisajes ganaderos. Serie técnica Informe técnico, no. 372. CATIE, Turrialba, Costa Rica
- Villar Montero R, Ruiz-Robledo J, Quero Pérez JL, Poorter H, Valladares Ros F, Marañón T (2008) Tasas de crecimiento en especies leñosas: aspectos funcionales e implicaciones ecológicas *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*:193-230
- WordPress (2017) Región Caribe y turismo en Colombia.
- Yacomelo MJ (2015) Establecimientos de arboretums en el CI Caribia utilizando material vegetal producido en el año anterior. Colombia
- Zanne AE et al. (2009) Data from: Towards a worldwide wood economics spectrum. *Dryad Digital Repository*. doi:doi:10.5061/dryad.234

## Anexos

### *Anexo 1. Edad de los árboles durante cada medición de las variables*

<b>Variable</b>	<b>Fecha</b>	<b>Edad después del trasplante (meses)</b>
	Octubre 2014	3
	Diciembre 2014	5
	Febrero 2015	7
	Junio 2015	11
Diámetro a la altura del pecho, altura total y altura comercial	Octubre 2015	15
	Febrero 2016	19
	Agosto 2016	25
	Febrero 2017	31
	Agosto 2017	37
	Febrero 2018	43
	Agosto 2018	49
Factor de forma del volumen, diámetro de copa, oclusión	Octubre 2018 a	51-53
	Diciembre 2018	

**Anexo 2. Promedio de la altura total con sus errores estándar por especie durante la etapa juvenil (3 a 49 meses de edad)**

Edad (meses)	Altura total (m)										
	3	5	7	11	15	19	25	31	37	43	49
<i>Aspidosperma polyneuron</i>	0.15±0.00	0.23±0.01	0.40±0.02	0.68±0.02	0.84±0.02	1.16±0.04	1.78±0.05	2.15±0.06	2.60±0.07	3.07±0.07	3.83±0.09
<i>Bulnesia arborea</i>		0.27±0.01	0.68±0.04	0.97±0.06	1.23±0.07	1.72±0.08	2.33±0.09	3.11±0.12	3.67±0.12	4.20±0.12	4.93±0.11
<i>Caesalpinia ebano</i>	1.64±0.06	1.88±0.07	2.42±0.10	2.83±0.10	3.37±0.12	4.21±0.14	4.81±0.15	5.67±0.15	6.17±0.14	6.70±0.14	7.59±0.16
<i>Cavanillesia platanifolia</i>	1.44±0.04	1.57±0.05	2.01±0.07	2.62±0.10	3.10±0.11	3.93±0.17	5.54±0.17	6.53±0.16	7.58±0.17	8.57±0.16	10.18±0.14
<i>Peltogyne purpurea</i>	0.40±0.01	0.50±0.01	0.64±0.02	0.83±0.02	0.98±0.03	1.38±0.04	2.10±0.07	2.74±0.08	3.30±0.08	4.11±0.10	4.94±0.11
<i>Pachira quinata</i>	0.99±0.04	1.14±0.04	1.42±0.04	1.62±0.04	2.12±0.05	2.64±0.06	3.27±0.08	5.15±0.09	6.67±0.08	7.03±0.08	8.72±0.10
<i>Samanea saman</i>	1.82±0.05	2.31±0.07	3.32±0.08	4.33±0.08	5.38±0.10	6.81±0.12	7.72±0.13	9.14±0.21	10.00±0.22	10.50±0.22	11.40±0.25
<i>Tectona grandis</i>	0.61±0.02	1.47±0.04	2.61±0.09	4.80±0.12	6.54±0.14	8.20±0.13	9.20±0.12	10.98±0.16	12.48±0.14	12.88±0.14	14.13±0.10
<i>Tabebuia rosea</i>	0.52±0.01	0.84±0.03	1.35±0.05	2.07±0.09	2.61±0.11	3.20±0.12	3.80±0.13	5.58±0.14	6.72±0.14	8.06±0.14	9.38±0.15

**Anexo 3.** Promedio del diámetro a la altura del pecho con sus errores estándar por especie durante la etapa juvenil (7 a 49 meses de edad). Esta variable se tomó cuando los árboles alcanzaron 1.3 m de altura y por esta razón se inició a partir del séptimo mes

Edad (meses)	Diámetro a la altura del pecho (cm)								
	7	11	15	19	25	31	37	43	49
<i>Aspidosperma polyneuron</i>							2.95 ± 0.14	4.46 ± 0.19	5.81 ± 0.23
<i>Bulnesia arborea</i>							6.11 ± 0.33	8.29 ± 0.38	9.4 ± 0.41
<i>Caesalpinia ebano</i>						4.98 ± 0.19	6.6 ± 0.25	7.45 ± 0.29	9.13 ± 0.35
<i>Cavanillesia platanifolia</i>	2.1 ± 0.08	3.0 ± 0.15	3.57 ± 0.19	5.16 ± 0.28	9.0 ± 0.37	11.02 ± 0.41	13.84 ± 0.46	18.52 ± 0.55	19.82 ± 0.58
<i>Peltogyne purpurea</i>							3.7 ± 0.17	5.19 ± 0.2	5.84 ± 0.22
<i>Pachira quinata</i>				3.85 ± 0.14	9.14 ± 0.27	11.53 ± 0.32	14.27 ± 0.32	16.31 ± 0.37	18.04 ± 0.41
<i>Samanea saman</i>				11.76 ± 0.27	14.57 ± 0.37	16.13 ± 0.44	17.52 ± 0.49	18.64 ± 0.56	20.75 ± 0.71
<i>Tectona grandis</i>		4.32 ± 0.11	5.51 ± 0.11	8.27 ± 0.14	12.5 ± 0.19	14.23 ± 0.24	16.28 ± 0.29	18.02 ± 0.34	19.79 ± 0.39
<i>Tabebuia rosea</i>				2.59 ± 0.12	5.31 ± 0.22	7.94 ± 0.3	10.23 ± 0.32	13.03 ± 0.35	14.36 ± 0.37