

Los bosques plantados tropicales secuestran altos volúmenes de carbono en su vida útil. Si estos agroecosistemas se administran correctamente, contribuirán notablemente a la mitigación del calentamiento global acelerado.

El carbono es capturado mediante el crecimiento de los árboles, lo cual, diferentes prácticas de manejo condicionarán su efectividad en torno a la incorporación del carbono atmosférico en su biomasa.

El establecimiento de bosques plantados forestales bajo técnicas de manejo eficientes y sostenibles, garantizan que los reservorios de carbono se mantengan a largo plazo.

Además de la biomasa vegetal, el suelo también actúa como secuestrador de carbono, por ende, será de vital importancia garantizar su conservación en los ecosistemas forestales.

El aprovechamiento sostenible de los bosques plantados en torno a la producción de bienes y servicios también puede elevar el almacenamiento de carbono global.



BARB: Ingeniero Agroforestal, Maestro en Ciencias de Productos Forestales y Doctor en Ciencias en Biosistemática, Ecología y Manejo de Recursos Naturales y Agrícolas. Investigador Forestal del Campo Experimental Santiago Ixcuintla (Santiago Ixcuintla, Nayarit).

EHA: Ingeniero agrónomo. Doctor en Ciencias Forestales. Investigador de la Universidad de Guadalajara, adscrito al Departamento de Producción Forestal.

Secuestro de carbono en bosques plantados del trópico de México

Bosques plantados de *Gmelina arborea*
Roxb. ex Sm



Secuestro de carbono en bosques plantados del trópico de México

**Bosques plantados de *Gmelina arborea*
Roxb. ex Sm**

e-version

Bayron Alexander Ruiz Blandon
Efrén Hernández Álvarez

Secuestro de carbono en bosques plantados del trópico de México

Bosques plantados de *Gmelina arborea*
Roxb. ex Sm

e-version

ELIVA PRESS

ISBN: 978-99993-2-409-0

© Eliva Press Global Ltd. part of Eliva Press S.R.L., 2025

© Bayron Alexander Ruiz Blandon, Efrén Hernández Álvarez

Cover Design: Eliva Press

Cover Image: www.ingimage.com

Email: info@elivapress.com

Website: www.elivapress.com

This Eliva Press imprint is published by the registered company Eliva Press Global Ltd. part of Eliva Press S.R.L. Publishing Group

The registered company address is: Pope Hennessy Street Level 2, Hennessy Tower
Port Louis, Mauritius

Eliva Press S.R.L. Publishing Group legal address is: Bd. Cuza-Voda 1/4 of. 21,
Chisinau, Moldova, Europe

No part of this book may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording, or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from Eliva Press. Any brand and product names mentioned in this book are subject to the trademark, brand, or patent protection and are trademarks of their respective owners. The use of brand names, trade names, product names, product descriptions, is in no way implies that such names may be regarded as unrestricted by trademark and brand protection laws and thus may be used by anyone. The opinions and views expressed are exclusively those of authors/contributors and in no way the editors or publisher is responsible.

All rights reserved.

Secuestro de carbono en bosques plantados del trópico de México

Dr. Bayron Alexander Ruiz Blandon

Dr. Efrén Hernández Álvarez

Resumen

La Melina (*Gmelina arborea*) es una especie de rápido crecimiento considerada de uso múltiple y reconocida en los mercados maderables internacionales por su calidad. La especie fue introducida en México a partir de 1998 en algunos estados del noreste, oeste y sureste.

Poco se ha documentado sobre el comportamiento de la especie referente al crecimiento, producción de biomasa y captura de carbono en términos comerciales en el país, por ende, el presente trabajo plantea como objetivo evaluar, la producción de biomasa y carbono secuestrado en un bosque plantado puro (BP) y en uno mixto (BM) de *G. arborea* a los 15 años de edad en el Municipio de Santiago Ixcuintla, Nayarit, México. Se establecieron tres parcelas de 1000 m² para la toma de datos y colecta de muestras en BP y BM.

Se midió el diámetro y la altura total de los árboles, se derribaron 30 de la especie en cada plantación, se pesó la biomasa y se colectaron muestras de hojas, ramas, fustes y raíces, mantillo y suelo a diferentes profundidades para su respectivo análisis en laboratorio.

El ANOVA y las pruebas de comparación de medias Tukey ($p > 0.05$) indicaron diferencias significativas entre las variables evaluadas. La *G. arborea* establecida en BM desarrolló mayor diámetro (12 %) y área basal (11 %) por árbol que en la BP. La *G. arborea* en BM representó el 39 % del volumen total por superficie y *Cordia alliodora* fue la especie de menor rendimiento (22 %).

El volumen total de madera por superficie del BM fue 27 % superior que en el BP. El BM tuvo un 55 % más de biomasa que BP donde fue la *G. arborea* preponderante. La *G. arborea* establecida en BM produjo mayor cantidad de biomasa que el BP, siendo destacable el mayor incremento del fuste (20 %) y raíz (51 %) promedio árbol, además, acumuló un 14 % más de C que BP.

A nivel de superficie del BM fue más eficiente en el almacenamiento de C que la BP (37.1 Mg C ha⁻¹ de diferencia) donde la *G. arborea* representó el 53.2 % del total. La producción de biomasa y C del mantillo en BM superó en 5.7 y 10.9 % al producido en BP; no obstante, el suelo de ambos bosques plantados tuvo un comportamiento similar con respecto a las variables en mención.

El arreglo de los bosques plantados, manejo silvícola, características de los sitios y la edad, son factores que influyen directamente en el secuestro de carbono de bosques plantados con *G. arborea*.

Agradecimientos

Agradezco Dios y seres queridos por participar indirectamente en mi proceso de formación doctoral, por darme soporte en los momentos difíciles que afronte en el desarrollo del posgrado. Gracias a ellos, soy una persona de bien y proactiva. Espero ser el referente de mi familia y para todos los que confiaron en mí.

Al predio la “Despensa” en propiedad del **Lic. Álvaro Navarro Esquivel (QEPD)** y colaboradores por vincularse activamente y permitir la ejecución del proyecto de investigación en Bosques plantados comerciales de Melina.

Al **Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT)** por otorgarme la beca para realizar el Doctorado en México.

A la **Organización Internacional de las Maderas Tropicales (OIMT)** por otorgarme un apoyo de refuerzo para realizar algunas actividades del proyecto doctoral.

A la **Universidad de Guadalajara**, por otorgarme una beca para realizar una estancia de investigación en España.

e-version

Dedicatoria

A Dios, por darme la sabiduría de afrontar con responsabilidad y madurez este reto en mi vida.

A Marilyn Ruiz y Lovren Ruiz (QEPD) por ser parte indirecta e incondicional del proyecto.

A mis hermanos.

A México, por haberme dado la oportunidad de superarme académicamente.

¡Muchas gracias!

TABLA DE CONTENIDO

Resumen.....	II
Agradecimientos.....	IV
Dedicatoria.....	VII
Lista de figuras.....	X
Lista de cuadros.....	XI
1. Introducción.....	1
2.Marco de Referencia.....	5
2.1 Melina (<i>Gmelina arborea</i> Roxb ex Sm): descripción botánica, distribución climática y usos de la biomasa.....	5
2.2 Producción forestal en México.....	7
2.2.1 Bosques plantados de <i>Gmelina arborea</i>	8
2.3 Cambio climático: gas efecto invernadero (GEI) y el ciclo del carbono.....	12
2.3.3 Importancia de las coberturas vegetales en el cambio climático.....	14
2.4 Estimación de la biomasa y carbono en coberturas forestales.....	15
2.5 El suelo como almacén de carbono.....	16
2.6 Sumidero desconocido de carbono (Missing sink).....	20
3. Antecedentes.....	25
4. Métodos.....	27
4.1 Área de estudio.....	27
4.2 Procedimientos.....	29

4.2.1 Diagnóstico de los bosques plantados.....	29
4.2.2 Campo.....	31
4.2.2.1 Dasometría, biomasa, mantillo y suelo.....	31
4.2.3 Gabinete.....	33
4.2.3.1 Cálculo de las variables dasométricas y construcción de ecuaciones alométricas para la estimación de la biomasa.....	34
4.2.3.1.1 Dasometría.....	34
4.2.3.1.2 Cuantificación de la biomasa y construcción de modelos biométricos	36
4.2.3.1.3 Derminación de las propiedades físicas y químicas de los suelos.....	38
4.2.3.1.4 Propiedades físicas.....	38
4.2.3.1.5 Propiedades químicas.....	38
4.2.3.2 Secuestro de carbono en bosques plantados.....	39
4.2.3.2.1 Contenido de carbono y nitrógeno en biomasa y suelo.....	40
4.2.3.2.2 Secuestro de carbono en biomasa y suelo.....	40
4.2.4 Análisis de la información.....	41
5 Resultados.....	42
5.1 Crecimiento, modelos biométricos y propiedades del suelo en bosques plantados de Gmelina arborea.....	42
5.1.1 Crecimiento de bosques plantados y propiedades del suelo.....	42

5.1.2 Modelos biométricos.....	44
5.2 Producción de biomasa y secuestro de carbono en bosques plantados de Gmelina arborea.....	50
5.2.1 Producción de biomasa arbórea.....	50
5.2.2 Secuestro de carbono en la biomasa arbórea.....	52
5.2.3 Producción de biomasa y secuestro de carbono en mantillo.....	52
5.2.4 Secuestro de carbono en el suelo de bosques plantados.....	55
6. Discusión.....	57
6.1 Estructura forestal, condiciones de sitio y ecuaciones de biomasa.....	57
6.2 Valoración de la biomasa y carbono en bosques plantados comerciales ...	61
7. Conclusiones.....	68
8. Referencias.....	70

Lista de figuras

Figura 1. <i>G. melina</i> de 15 años de edad establecida en el estado de Nayarit, México. Lado izquierdo: árbol en pie con DAP> 30 cm, lado derecho: hojas, flores y frutos.....	6
Figura 2. Bosque plantado de <i>G. arborea</i> de 15 años de edad en época de sequía, Estado de Nayarit, México.....	11
Figura 3. Geolocalización de bosques plantados puros y mixtos. Circulo: bosque plantado mixto, Triangulo: bosque plantado puro, Rectángulo: parcelas de muestreo.....	28

Lista de cuadros

Cuadro 1. Estructura forestal en bosques plantados de 15 años en el Estado de Nayarit, México ($n = 30$).....	47
Cuadro 2. Propiedades de los suelos en bosques plantados del Estado de Nayarit, México ($n = 3$).....	48
Cuadro 3. Modelos biométricos de biomasa para <i>G. arborea</i> ($n = 60$), <i>C. alliodora</i> ($n = 30$) y <i>P. guachapele</i> ($n = 30$).....	49
Cuadro 4. Producción de biomasa y secuestro de carbono en bosques plantados del Estado de Nayarit, México ($n = 30$).....	53
Cuadro 5. Producción de biomasa y secuestro de C del mantillo de dos bosques plantados de <i>G. arborea</i> en el Estado de Nayarit, México ($n = 3$).....	55
Cuadro 6. Secuestro de C en los suelos de bosques plantados en el Estado de Nayarit, México ($n = 3$).....	56

1. Introducción

La Melina (*Gmelina arborea* Roxb ex Sm.) es un árbol pertenece a la familia Lamiácea, aunque diversos autores discuten su agrupación (Davidse et al. 2012, GRIN 2018a). Es originaria del sureste de Asia, se desarrolla en hábitats que varían entre muy húmedos y secos. En bosques naturales *G. arborea* se asocia con la Teca (*Tectona grandis*) y el Asan (*Terminalia tomentosa*) (Rojas et al. 2004, Dhakulkar et al. 2005, GRIN 2018a).

La *G. arborea* es conocida en los mercados forestales por sus propiedades físico-mecánicas de la madera (Moya 2001), especies de rápido crecimiento, multipropósito (fibra, ornamental, medicinal), tolerante a altos rangos de temperatura (18-35 °C), precipitación y humedad (1778-2286 mm, 40 % de humedad, respectivamente) y tiene la capacidad de adaptarse muy bien en suelos con pH ácido a neutro.

Debido a las características anteriores de condiciones de sitio, *G. arborea* se ha plantado en gran parte del mundo (Dvorak 2004, Onyekwelu 2004, Dudhane et al. 2011, GRIN 2018a).

G. arborea es exótica para México encontrándose diseminada en bosques tropicales caducifolios y rara vez en perennifolios; si bien, fue introducida en la modalidad de bosques plantados comerciales (PBC) a partir de 1998, siendo los estados pioneros Guerrero, Campeche, Tabasco, Veracruz, Quintana Roo, Chiapas, Oaxaca, Nayarit y Yucatán según reportes de la CONAFOR (2000, 2012, 2013).

La superficie plantada con *G. arborea* es de 12.8 % aproximadamente en relación a otras especies tropicales plantadas en el país CONAFOR (2012, 2013).

Los bosques plantados puros (BP) y naturales han sido estudiados en diferentes aspectos en la última década (Kaul et al. 2010, Forrester et al. 2013), sin embargo, se ha demostrado que los bosques plantados mixtos (BM) mejoran

algunas propiedades del suelo, aunque son menos eficientes en la acumulación de biomasa y carbono (C) (Chaturvedi y Raghubanshi 2015).

Investigaciones recientes, indicaron que los árboles en BM se adaptan con mayor facilidad cuando son establecidos en suelos degradados, acumulando mayor C subterráneo (Forrester et al. 2013, Keleş et al. 2017).

Además de lo anterior, los bosques plantados cumplen funciones ecológicas, socioculturales y económicas, interviniendo en la producción de agua y protección de suelo (Soalleiro et al. 2007, Corona-Núñez et al. 2018).

La remoción de la cobertura arbórea ha impactado negativamente en la vitalidad del planeta, sin embargo, la acción antrópica más significativa que produce un cambio climático acelerado debido a los gases efectos invernadero (GEI) derivado de las emisiones de CO₂ es la quema de combustibles fósiles (Ibrahim et al. 2007, González y Gómez 2015, FAO 2017).

En los último 60 años la concentración de CO₂ en la atmósfera aumentó de 280 a 400 ppm (IPCC 2007, Grünewald et al. 2014). Dentro de las alternativas propuestas para mitigar este cambio climático, se ha planteado el establecimiento de bosques plantados con especies de rápido crecimiento y valor comercial, puesto que tienen la capacidad de fijar el CO₂ atmosférico en su biomasa aérea y almacenar el C en el suelo (IPCC 2007, Almeida et al. 2010).

2. Marco de Referencia

2.1 Melina (*Gmelina arborea* Roxb ex Sm): descripción botánica, distribución climática y usos de la biomasa

La Melina (*Gmelina arborea* Roxb ex Sm.) es una especie perteneciente a la familia Lamiácea (GRIN 2018a) originaria del sureste de Asia; en las zonas de origen, puede alcanzar hasta los 30 m de altura y 90 cm (Figura 1). Es un árbol caducifolio, donde pierde sus hojas entre enero y marzo y; los frutos maduran entre mayo y junio (CONABIO-PRONARE 2006).

En México la *G. arborea* se ha plantado en los estados de Guerrero, Campeche, Tabasco, Veracruz, Quintana Roo, Chiapas, Oaxaca, Nayarit, Colima y Yucatán, desde 0 a 1500 m de altitud a temperaturas entre los 24 y 31 °C con precipitaciones máximas de 4500 mm anuales en suelos poco profundos, Franco-arcillosa y ligeramente arenosa, bien drenados, húmedos con pH entre ácidos y alcalinos (CONABIO-PRONARE 2006).

El transcendental producto de la *G. arborea* es la madera, siendo utilizada en la fabricación de muebles, tableros, instrumentos musicales, triplay, entre otros (CONABIO-PRONARE 2006). Además de lo anterior, su biomasa consta de principios medicinales (frutos, flores, hojas, raíces y corteza: tos, dolores de cabeza, problemas estomacales y enfermedades de la sangre) (CONABIO-PRONARE 2006).



Figura 1. *G. melina* de 15 años de edad establecida en el estado de Nayarit, México. Lado izquierdo: árbol en pie con DAP > 30 cm, lado derecho: hojas, flores y frutos.

2.2 Producción forestal en México

Los bosques suministran variedad de beneficios, tanto ambientales como sociales y económicos, contribuyendo al desarrollo del país, no obstante, mantener la cobertura forestal en México, constituye un auténtico reto teniendo en cuenta las necesidades presentes y futuras en una población creciente (SEMARNAT 2016). Una parte de los productos base madera de los bosques en México derivan de las coníferas y en menor proporción de latifoliadas, donde se extrae la celulosa, postes, leña, carbón, etc. (SEMARNAT 2016).

Durante el 2007 hasta el 2016 la producción maderable se ha reducido de 7 millones de metros cúbicos rollo ($M\ m^3r$) a $6.7\ M\ m^3r$ siendo los principales estados productores en 2016, Durango (35.1 %), Chihuahua (13.2 %), Veracruz (7.8 %), Michoacán (6.7 %) y Oaxaca (5.9 %) que representaron el 68.6% de la producción total, equivalente a $4.6\ M\ m^3r$ (SEMARNAT 2016).

Los principales productos derivados de la actividad forestal en 2016 fueron: madera para aserrío (74.9 %), leña y carbón (9.4 %) y, la extracción de celulosa, chapa y triplay, postes, pilotes y morillos (15.7 %) (SEMARNAT 2016).

En México existen 7 M ha aproximadamente de zonas templadas y tropical aptas para establecer bosques plantados comerciales donde el 80 % se ubica en regiones tropicales y subtropicales con tipos de suelos y climas propicios para alcanzar rápidos crecimientos (CONAFOR 2013).

Los bosques plantados de *G. arborea* representan el 12.8 % del total de superficie plantadas (65,367.4 ha) y el 22.1 % del volumen total de madera (5,426,766) entre especies latifoliadas y coníferas en el país. *G. arborea* ha tenido muy buena aprobación por parte de los agricultores, plantándose a espaciamientos de 3.5 x 3.5 m con turnos de aprovechamientos máximos de 25 años (CONAFOR 2013).

2.2.1 Bosques plantados de *Gmelina arborea*

Los bosques plantados (Figura 2) producen a la sociedad productos maderables y no maderables (miel, forraje y medicinas) así, como servicios ambientales (paisajísticos, conservación de suelos, secuestro de C, entre otros) (Martínez-Zurimendi et al. 2015).

Si bien, es imprescindible identificar el potencial productivo los árboles y desarrollar programas de manejo sobre todo en esta época de apogeo de los bosques plantados comerciales para lo cual, es indispensable identificar el nivel productivo de los suelos forestales (Martínez-Zurimendi et al. 2015).

Un error en este aspecto influye claramente la productividad de las especies, no obstante, normalmente se establecen bosques plantados en lugares erróneos para garantizar un óptimo crecimiento de la especie (FAO 2017).

La disponibilidad de agua (favorece el transporte de los nutrientes en la planta), condiciones idóneas del suelo y clima, impactan positivamente en la productividad de los bosques plantados de *G. arborea* (Swamy et al. 2003, Rojas et al. 2004, Muñoz-Acosta y Berrocal-Jiménez 2012).

Diferentes investigaciones han evidenciado que, la productividad en bosques plantados comerciales de *G. arborea* difieren notablemente entre sitios, ya sean por factores ambientales y manejo, por ende, a la edad de 15 años en Nigeria y

Costa Rica se han reportado $550.5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (Onyekwelu et al. 2006) y $240.1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ en producción maderable respectivamente (Espinoza-Durán y Moya 2013).

El Incremento Medio Anual (IMA), es una variable importante para tomar decisiones en el manejo forestal e indica el potencial productivo de biomasa en una especie, creciendo bajo condiciones de sitio, manejo y edad determinada; en sitios apropiados los árboles pueden alcanzar hasta los $35 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ considerándose exitoso (Jiménez 2016).

No obstante, estos rendimientos superarían los $40 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ según la procedencia de la plantación y la edad (Moya 2004, Vanclay et al. 2008). En México se han obtenido IMA entre 7.5 y $33.2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (Martínez-Zurimendi et al. 2015).

Estudios realizados en bosques plantados de 12 años en Costa Rica, han confirmado que, en sitios de excelente calidad, se podrían producir $435.7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ y alcanzar incrementos de $36.3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, siendo el caso contrario si las condiciones son adversas ($181.2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ y $15.1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) (Jiménez 2016).



Figura 2. Bosque plantado de *G. arborea* de 15 años de edad en época de sequía, Estado de Nayarit, México.

2.3 Cambio climático: gas efecto invernadero (GEI) y el ciclo del carbono

El cambio climático es el resultado del aumento acelerado de Gases Efecto Invernadero (GEI) en la atmósfera (González y Gómez 2015). El calentamiento mundial inducido por el aumento de GEI no es el único que propicia el cambio climático también, influye el cambio en el uso del suelo forjado por las acciones antrópicas que modifican sustancialmente la atmósfera, produciendo variaciones en el ciclo de la vida y el aumento la temperatura global (González y Gómez 2015, Olmedo et al. 2015).

El Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) indicó que los sistemas agropecuarios emiten significativamente CH_4 , CO_2 y N_2O , no obstante, de los GEI el más importante es el CO_2 y su concentración atmosférica aumentó en los último 60 años de 280 a 400 ppm (IPCC 2007, Grünewald et al. 2014).

Desde 1990 hasta el 2015 se ha reportado que el 64 % de emisiones correspondieron al consumo de combustibles fósiles; 10 % de los sistemas pecuarios; 8 % consecuentes de los procesos industriales; 7 % por el manejo de

residuos; 6 % causado por los procesos de extracción de petróleo, gas y minerías y un 5 % se forjaron por actividades agrícolas (INECC 2018).

El C es elemento primordial de los organismos que, al ser combinado con el N, P, S, O e H forman la vida (Montero et al. 2005). La atmósfera funciona como un enorme sistema de transporte de energía entre zonas cálidas y frías debido a su alto contenido en humedad (Montero et al. 2005).

El agua al retener calor y evaporarse, permite equilibrar el clima del planeta, por ende, el ciclo del C es complejo, aunque se remite en su fijación atmosférica por medio de la fotosíntesis donde éstas utilizan CO_2 y liberan O_2 vital para la vida humana (Montero et al. 2005, Valdés 2011).

El C circula firmemente entre la materia necrosada y viva donde las plantas lo fijan e incorporan a su biomasa, sin embargo, la respiración de los bosques, la caída de las partes de las plantas, devuelven a la atmósfera parte del C captado, por lo tanto, la existencia de vida terrenal depende de la circulación del C entre

biosfera, atmósfera, hidrosfera y litosfera, conociéndose como ciclo del C (Montero et al. 2005, FAO y PNUMA 2020).

El C al unirse con el O₂ forma el CO₂, cuya existencia en la atmósfera es imprescindible en la regulación de la temperatura de la tierra debido a sus atributos como gas de invernadero (Jaramillo 2004).

2.3.3 Importancia de las coberturas vegetales en el cambio climático

Las coberturas vegetales operan como almacenes de C, aunque su eficacia dependerá de diversos factores (manejo silvícola, suelo, condiciones edafoclimáticas etc.) no obstante, en se ha incrementado la estimación de la biomasa forestal y el C acumulado según el Protocolo de Kioto donde se reconoce la importancia de los bosques en la mitigación de cambio climático (Jaramillo 2004).

Diferentes investigaciones han confirmado que los árboles requieren 3.67 kg CO₂ para formar 1 kg de biomasa, por consiguiente, los bosques plantados y bosques naturales son almacenadores de C a largo plazo (Balboa et al. 2006). Los inventarios de biomasa, han sido las técnicas más usuales para cuantificación el

C capturado por los árboles en sus respectivos sitios de crecimiento (Jaramillo 2004, Balboa et al. 2006, Gómez-García y Pérez-Rodríguez 2015).

2.4 Estimación de la biomasa y carbono en coberturas forestales

Los métodos para estimar la biomasa de un bosque se basan en cálculos directos o indirectos (Brown 1997).

El **método directo**, se fundamenta en realizar mediciones dasométricas del árbol, derribo y pesaje en fresco de la biomasa por componentes (hojas, ramas, fuste y raíces) sin embargo, dichos resultados pueden ser proyectándose a Mg ha^{-1} (Segura y Andrade 2008).

El **método indirecto** radica en calcular la biomasa y C de los árboles sin ser derribados, aunque usualmente, se emplean ecuaciones alométricas para dicho fin y su elección dependerá de la disponibilidad de datos de la especie objeto de la investigación (Watzlawick et al. 2001).

Las ecuaciones alométricas, son expresiones matemáticas que facilitan el inventario de biomasa y C a partir de variables independientes como el DAP y altura de las plantas (Watzlawick et al. 2001).

2.5 El suelo como almacén de carbono

Los suelos son trascendentales depósitos de C y lo almacenan en mayor proporción combinado con la atmósfera y las plantas, sin embargo, el carbono orgánico del suelo (COS) es dinámico y las acciones antrópicas pueden convertirlo en un sumidero o fuente neta de GEI (FAO 2017).

Los científicos han logrado entender la dinámica del COS, por consiguiente, el monitoreo de las existencias de COS a nivel nacional y global aún afrontan monumentales retos que impiden la ejecución de diseños efectivos sobre el uso de la tierra a nivel regional (FAO 2017).

El COS es parte del ciclo del C global donde interviene, la vegetación, los océanos y la atmósfera (FAO 2017). Se ha estimado que el suelo almacena 1,500 Petagramos de C (Pg C) a 1 m, siendo superior al contenido atmosférico (800 Pg

C) y la vegetación terrestre (500 Pg C) combinados, además, son depósitos que están movimiento desde las formas más simples como las moleculares (Hernández 2010, FAO 2017).

El CO_2 y CH_4 son los principales GEI y; las plantas, así como los microorganismos autótrofos fotoeléctricos y quimioterápicos, sintetizan el CO_2 atmosférico en material orgánico (Schmidt et al. 2011).

La biomasa necrosada se incorpora al suelo gracias a la fauna y microorganismos del mismo, lo que conduce a entradas de C a través de la transformación del material orgánico (Schmidt et al. 2011).

El proceso de transformación de material orgánico da como resultado la generación de mantillo y productos de descomposición microbiana en diferentes etapas de la descomposición (Paul 2014), que puede asociarse a nutrientes del suelo permitiendo la persistencia de COS por mucho tiempo (Schmidt et al. 2011).

El CO_2 se inserta a la atmósfera cuando los microorganismos mineralizan la materia orgánica del suelo, por ende, la pérdida de C también se produce por la exudación de las raíces por medio del ácido oxálico (FAO 2017).

El importe de COS depende del equilibrio entre la cantidad de C que ingresa y el eliminado por el suelo como gases por medio de la respiración, lo cual, resulta de la mineralización microbiana y, en menor medida, la lixiviación del suelo como COD (FAO 2017).

Se puede ganar o perder C a través de la erosión o deposición del suelo, lo que lleva a su redistribución a escala local, paisajística y regional (FAO 2017).

Los factores abióticos que intervienen en la descomposición de la materia orgánica en el suelo son la temperatura y el contenido humedad que influyen en gran medida en el almacenamiento de C en el suelo a través de su efecto sobre la actividad microbiana (Thévenot et al. 2010).

La constitución microbiana del suelo también puede influir sobre la descomposición de algunos compuestos de la biomasa necrosada, además, las sustancias químicas que crean recalcitrancia de las moléculas complejas del COS son las ligninas (Thévenot et al. 2010).

La base principal del COS es el contenido de la materia orgánica, por consiguiente, es más importante conocer la velocidad y el equilibrio entre procesos de mineralización y humificación que está condicionado por la actividad microbiana en el suelo (Gamarra et al. 2018).

Para conocer la velocidad de proliferación de microorganismos y la rapidez en la mineralización de la materia orgánica se utiliza la relación C/N ya que es un índice de la calidad del sustrato orgánico del suelo, además, también indica la tasa de N disponible para las plantas (Gamarra et al. 2018).

Valores altos de N indican que la materia orgánica se descompone lentamente, puesto que los microorganismos lo inmovilizan y no puede ser utilizado por las plantas, cuando la relación esta entre 10 y 14, corresponden a una mineralización y descomposición rápida de tejidos, ya que la actividad microbiana se estimula, hay nutrientes suficientes para los microorganismos y para los vegetales; si la relación C/N de bacterias y hongos del suelo es menor a 15, indica que los microorganismos serán más eficientes en la descomposición de la materia orgánica (Gamarra et al. 2018).

2.6 Sumidero desconocido de carbono (*Missing sink*)

En la década de 1990, diferentes investigadores se toparon con un enigma cuando trataron de ubicar todo el C que los humanos estaban emitiendo al quemar combustibles fósiles (Popkin 2015).

Las mediciones revelaron que alrededor de tres cuartas partes del CO₂ se almacenaba en la atmósfera y los océanos, el resto fue posiblemente capturado en tierra, aunque, nadie sabía a dónde iba, por ende, dicho dilema fue conocido como el "sumidero perdido" (Popkin 2015).

Los bosques que obtienen el C del aire a través de la fotosíntesis, eran un posible resguardo del C (Odum 1969).

Parecía entendible que los bosques pudieran estar absorbiendo el C que faltaba, pero los ecólogos fueron lentos en reconocer que dicho ecosistema podrían ser el sumidero faltante, aunque a finales de 1960, se argumentó que los ecosistemas no perturbados alcanzaban rápidamente un equilibrio lo cual,

perdían tanto C a través de la respiración, muerte y descomposición de la biomasa, además de ganarlo por medio de la fotosíntesis (Odum 1969).

Algunos científicos analizaron 22 años de datos y encontraron que los bosques de diferentes edades crecían de dos a cuatro veces más rápido de lo esperado (McMahon et al. 2010).

Los registros de crecimiento de los árboles fueron amparados por mediciones de CO₂ tomadas en altas torres en más de 20 sitios en América del Norte y Europa lo cual, revelaron que muchos bosques absorbieron más CO₂ del que emitieron (Keenan et al. 2013).

El crecimiento acelerado de la humanidad está teniendo un efecto importante en el ciclo global del C, no obstante, en 2011 investigadores concluyeron que los árboles habían capturado suficiente C entre 1990 y 2007, dando señales del sumidero desconocido y según tasación este sumidero desconocido “the missing C sink” se cuantificó en alrededor de 1.8 a 2 Pg C año⁻¹ que se almacenan en ecosistemas terrestres, y alrededor de 2.5 Pg C año⁻¹ en los océanos, debido al incremento de la actividad del fitoplancton en el agua o una amplia fijación en el

suelo, aunque, los mayores capturadores de C fueron los bosques templados, en particular en zonas donde las tierras de cultivo abandonadas dieron paso a la regeneración con árboles de crecimiento rápido (Macías 2004, Pan et al. 2011).

Los bosques boreales de gran altitud absorbieron menor cantidad de C, y los bosques tropicales en conjunto, redujeron la absorción de C debido a la deforestación, por consiguiente, deteniendo la deforestación el planeta absorbería alrededor de la mitad del C emitido por los humanos, lo que frenaría sustancialmente el calentamiento global (Pan et al. 2011).

El problema ante un incremento acelerado de la concentración de CO₂ es saber a qué velocidad funcionan los mecanismos de amortiguación y cuál es su capacidad para aminorar el desequilibrio causado por las emisiones generadas entrópicamente (Macías 2004).

A nivel isotópico se sabe que, gran parte del C atmosférico es de origen antrópico, pero las ecuaciones iniciales preveían un calentamiento mucho más intenso y rápido que todas las mediciones realizadas en los últimos 10 años (Macías 2004).

Las fluctuaciones en las estimaciones de sumideros de C son grandes, debido a la escasas y calidad de los datos forestales (Popkin 2015).

Para determinar el tamaño y la ubicación del sumidero en los bosques, diferentes científicos están tratando de evaluar si ha cambiado, no obstante, han analizado alrededor de 850.000 (189.000 árboles) e identificaron que el gran sumidero de C del bosque amazónico está en retroceso, la absorción de C reportado en las parcelas durante el último decenio fue 1/3 menor que en 1990, siendo atribuido a múltiples factores como las grandes sequías que azotaron el Amazonas entre 2005 y 2010, lo cual, desaceleraron el crecimiento de los árboles en ese periodo, por otro lado, el aumento de las temperaturas y los niveles de CO₂ cambiaron los ciclos de vida de los árboles, causando prematuramente (Popkin 2015).

Existe un sesgo en la forma en que los investigadores han elegido las parcelas y medido la biomasa (Popkin 2015). Los bosques tropicales pueden ser cálidos, húmedos, peligrosos y en algunos casos casi imposibles de cuantificar, pues, en lugar de tomar muestras al azar, a menudo se elige los sitios de estudio basándose en la facilidad de acceso (Popkin 2015).

Las estimaciones de la biomasa varían dependiendo de la elección de las ecuaciones según la especie, para muchos árboles tropicales, todavía se están elaborando ecuaciones fiables; nadie duda que los bosques están absorbiendo parte del CO₂, aunque no hay seguridad de que tipo de bosques están captando mayores volúmenes, cuánto se almacena en el duramen en comparación con las raíces y el suelo (Popkin 2015).

e-version

3. Antecedentes

Muñoz et al. (2009) en Michoacán evaluaron el crecimiento en altura, diámetro y la supervivencia de la Teca, *Acrocarpus fraxinifolius* y *G. arborea*, además de comparar su incremento medio anual en relación a otros países en bosques plantados de 5 años.

Obtuvieron diferencias altamente significativas en los tratamientos probados, para las variables altura y diámetro donde *G. arborea* reportó los mayores crecimientos, supervivencia (94.96 %) e incremento medio anual en altura y diámetro de 3.4 m año⁻¹ y 5.10 cm año⁻¹, seguido de *A. fraxinifolius* (3.1 m año⁻¹ y 3.45 cm año⁻¹) y la Teca (2.7 m año⁻¹ y 2.6 cm año⁻¹) (Muñoz et al. 2009).

Arias et al. (2011) estudiaron el crecimiento temprano, biomasa y nutrientes de cuatro especies nativas y dos introducidas durante 6 años en la región sur de Costa Rica.

Las especies seleccionadas fueron: *Pinus caribaea* y *G. arborea* como especies introducidas, y *Terminalia amazonia*, *Vochysia ferruginea*, *Vochysia*

guatemalensis y *Hieronyma alchorneoides*. *G. arborea* fue la segunda especie con mejor promedio de diámetro a la altura del pecho (DAP), altura, área basal y, mayor volumen en los cuatro sitios estudiados lo cual, representó mayor acumulación de biomasa total (fuste y hojas), C y absorción de Ca (Arias et al. 2011).

Pellat et al. (2013) cuantificaron el C almacenado en Selva media y Sabana de *Quercus oleoides* y bosques plantados de *Eucaliptus urophylla* y *G. arborea* de 4 años en el fuste, herbáceas, raíz, hojarasca y ramas caídas en Tabasco, donde hubo mayor carbono almacenado en selva media y sabana de *Q. oleoides* (63.5 y 68.3 Mg ha⁻¹) seguido de los bosques plantados de *G. arborea* (15.5 Mg ha⁻¹).

También identificaron que el mayor porcentaje de biomasa se encuentra en el fuste, seguido de las raíces y por último en la hojarasca (Pellat et al. 2013).

4. Métodos

4.1 Área de estudio

El Municipio de Santiago Ixcuintla, Estado de Nayarit se encuentra ubicado sobre la Sierra Madre Occidental. BP y BM se geolocalizan a 21°43'35.7" N, 105°06'47.1" O y 21°43'38.3" N, 105°06'46.4"O (Figura 3).

El clima del área de estudio según la clasificación de Köppen modificada por García (1987) es cálido subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (Aw1 (w)), además, se encuentra entre 0 - 800 m de altitud y pendiente < 2 %. La temperatura media anual es de 24.4 °C, siendo extrema entre los meses de abril y julio (INEGI 2017).

La precipitación total anual es de 1529 mm con variaciones de 1085.9 a 2367.9 mm entre el periodo más seco al más lluvioso (INEGI 2017).

Geológicamente, los suelos son originarios de rocas sedimentarias clásticas, de dominancia Cambisoles Epiléptico (cm lep), destinados principalmente a la agricultura. La vegetación predominante en la zona es de selva baja caducifolia (FAO 2008; Soil Taxonomy 2014).



Figura 3. Geolocalización de los bosques plantados puros y mixtos. Circulo: bosque plantado mixto, Triángulo: bosque plantado puro, Rectángulo: parcelas de muestreo

4.2 Procedimientos

4.2.1 Diagnóstico de los bosques plantados

El estudio se realizó en dos bosques plantados de 15 años de edad (predio la Despensa) donde *G. arborea* se estableció en un sitio como especie única (bosques plantados puros: BP) y en otro, combinada con Laurel (*Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken) (GRIN 2018b) y Guayaquil (*Pseudosamanea guachapele* (Kunth) Harms (GRIN 2018c) (bosques plantados mixtos: BM).

Los bosques plantados se establecieron bajo las mismas condiciones de suelo y clima. Antes de establecerlas, se eliminó la cobertura vegetal existente, posteriormente, se aplicaron herbicidas para el control de la maleza como el Goal XL2 (oxifluorfén) y Glifosato, además de la eliminación manual (Machetes).

Se realizó la caracterización física y química del suelo a partir de muestras compuestas colectadas a 30 cm de profundidad en zigzag (10 m de distancia entre hoyos) para conocer el estado edáfico del sitio y realizar las acciones pertinentes para el acondicionamiento del sitio antes de la plantación.

El diagnóstico inicial de los suelos indicó que su textura fue franco-arcillosa con presencia de piedras de tamaños variables y problemas de compactación; muy alto en materia orgánica (MO) y pH moderadamente ácido (5.7 - 6.0).

En cuanto al nivel de fertilidad (macro y micronutrientes) fue mediano para N (N-NO_3), muy bajo en P (P-Bray), muy alto para K, alto en Ca, muy alto en Mg, muy bajo Na, alto en Fe y de mediano a bajo Mn y Cu.

En referencia a los anteriores resultados, se aplicaron 2 Mg ha^{-1} de cal agrícola para elevar el pH del suelo, 2 Mg ha^{-1} de gallinaza, fertilización a base de N-P-K (50-120-25) mezclado con 250 kg de fosfato diamónico (18-46-00), 20 kg de cloruro de potasio (00-00-60) y 24 kg de sulfato de potasio (00-00-50) al mes de haber plantado los árboles. La fertilización del suelo fue realizada por única vez.

Al momento de plantar los árboles, el marco de plantación fue de $3 \times 3 \text{ m}$ (densidad inicial de $1111 \text{ árboles ha}^{-1}$). La BP comprende una superficie de 12.8 ha, tuvo una densidad final de $273 \text{ árboles ha}^{-1}$ (basados en la supervivencia inicial del 81.8 %).

La BM comprende 20.4 ha (100 % supervivencia inicial) tuvo 603 árboles ha⁻¹, distribuidos 163 árboles ha⁻¹ de *G. arborea*, 190 árboles ha⁻¹ de *C. alliodora* y 250 árboles ha⁻¹ de *P. guachapele*, respetivamente.

El manejo silvícola de los bosques plantados se ajustó a los lineamientos de la CONAFOR (2000) aunque en la BM se realizó un único raleo a los 7 años.

4.2.2 Campo

Se llevó a cabo en bosques plantados comerciales de *Gmelina arborea* en el predio la “Despensa”, Sauta, Nayarit.

4.2.2.1 Dasometría, biomasa, mantillo y suelo

Las mediciones de árboles, muestreo de mantillo y suelo a diferentes profundidades, se realizaron en julio de 2016. En ambos bosques plantados se

establecieron tres parcelas rectangulares de 1000 m² (40 x 25 m) distribuidas en bloques aleatorios.

En la BP y BM se midió la altura total (h) con hipsómetro tipo Haga a 15 m de distancia de los árbol y diámetro (DAP) con una cinta diamétrica tomados a 1.3 m desde la base del fuste. Se derribaron 30 árboles de *G. arborea* en cada bosque plantado al igual que de *C. alliodora* y *P. guachapele*.

Aplicando la metodología de Parada et al. (2010) se pesó la biomasa por componente (hojas, ramas, fuste y raíz) usando una báscula eléctrica colgante Rhino BAC-300 de 300 kg $\pm$ 100 g de capacidad (Rhino maquinaria) y una Retroexcavadora CAT 420 F (Caterpillar, Latin America) como apoyo para el pesaje.

Luego, se cubicaron los árboles derribados con el fin de calcular su volumen con el método de Smalian (Cancino 2006). Se extrajeron trozas de *G. arborea* ubicadas entre la base del árbol y el DAP con el fin de realizar los ensayos físicos-mecánicos en el laboratorio.

En ambos bosques plantados, se colectaron tres muestras de mantillo en 1 m² tomando como referencia el punto central de cuatro árboles y se determinó su peso en fresco usando una báscula Rhino BAR-8 con capacidad de 40 kg ± 2 g (Rhino maquinaria) (Schlegel 2001).

También se construyeron tres calicatas de 0.45 m³ y se tomaron muestras de suelo de 0 - 15 y 15 - 45 cm en la BP y BM.

4.2.3 Gabinete

Los procedimientos fueron realizados en los laboratorios de la Universidad de Guadalajara:

CUCBA: Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias.

DMCyP: Departamento de Madera Celulosa y Papel.

CUCEI: Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías).

El Colegio de Postgraduados (Campus Montecillo) (Laboratorio de Agua-Suelo-Planta.).

La Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (Laboratorio de Física y Mecánica de la Madera).

La Universidad de Santiago de Compostela (Departamento de Edafología y Química Agrícola), España y la Universidad Politécnica de Madrid (Laboratorio de Tecnología de la Madera), España.

4.2.3.1 Cálculo de las variables dasométricas y construcción de ecuaciones alométricas para la estimación de la biomasa

Los procedimientos se realizaron en el Departamento de Producción Forestal del CUCBA.

4.2.3.1.1 Dasometría

A partir de la medición de la h y DAP en campo, se estimó el área basal (AB) según Arteaga y Castelán (2008) utilizando la siguiente ecuación (1):

Ecuación 1. Área basal (AB)

$$AB = 0.7854 (DAP)^2 \dots\dots\dots 1$$

Donde, AB: área basal (m²), DAP = Diámetro a la altura del pecho (m).

El volumen (V) se estimó con los datos de 30 árboles derribados en cada plantación. Se cubicó el fuste según *Smalian* (Cancino 2006) y el cálculo fue realizado con base a la ecuación (2):

Ecuación 2. Volumen

$$V = 0.7854 \frac{(D1+D2)^2}{2} * \dots\dots\dots 2$$

Donde, V: volumen de la troza (m³), D1: Diámetro menor de la troza (m), D2: Diámetro mayor de la troza (m), L: Longitud de la troza (m).

4.2.3.1.2 Cuantificación de la biomasa y construcción de modelos biométricos

Una vez determinado el peso de la biomasa fresca de los árboles y mantillo en campo; parte de dicha biomasa fue secada en un horno (Terlab S.A. de C.V.) a $70 \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar un peso constante y, por diferencia de pesos fue cuantificada la biomasa seca árboles como lo describió Parada et al. (2010).

La biomasa del mantillo fue calculada tomando como referencia los procedimientos descritos por Schelegel et al. (2001), determinándose inicialmente su contenido de humedad y por último la biomasa total seca mediante la siguiente ecuación (3):

Ecuación 3. Biomasa seca

$$B = Pf - Ps \dots\dots\dots 3$$

Donde, *B*: biomasa seca, *Pf*. peso fresco total y *Ps*: peso seco total.

Partiendo de la biomasa seca arbórea cuantificada por componente en *G. arborea* ($n = 60$), *C. alliodora* ($n = 30$) y *P. guachapele* ($n = 30$), fue realizado un análisis de correlación de Pearson con el fin de identificar la variable más importante (DAP, h y V) para estimar la biomasa en hojas, ramas, fuste, raíz y biomasa total (BT).

Tomando el DAP como referencia, los valores de $r^2 \leq 0.6$ en hojas, $r^2 \leq 0.6$ en ramas, $r^2 \leq 0.9$ en fuste, $r^2 \leq 0.8$ en raíz y $r^2 \leq 0.9$ en BT, sin correlacionar con la h .

El V únicamente correlacionó con la biomasa del fuste, raíz y BT ($r^2 \leq 0.6$).

Tomando como variable el DAP, a partir de 25 ecuaciones construidas mediante el análisis de regresión simple, fueron seleccionados las mejores ecuaciones por componente del árbol según valores de $r^2 \leq 1$ y el error estándar (Ee) ≤ 1 basados en la información señalada por Segura y Andrade (2008) y Parada et al. (2010).

4.2.3.1.3 Determinación de las propiedades físicas y químicas de los suelos

Los análisis fueron realizados en el laboratorio de suelos en el CUCBA. Al ser sometidas las muestras de suelo a un pretratamiento (secado, molido y tamizado en malla 60), se determinaron sus propiedades físicas y químicas según la norma NOM-021-RECNA-2000 (DOF 2002) y técnicas instrumentales a saber:

4.2.3.1.4 Propiedades físicas

La **Textura** fue determinada con el Hidrómetro de Bouyoucos.

La **Densidad Aparente (D_a)** por el método del terrón.

4.2.3.1.5 Propiedades químicas

El **pH** fue calculado con el *potenciómetro Orion Star A210* en relación 1:2.

La **Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)** se determinó mediante el uso de la *solución de Acetato de Amonio*.

La **Conductividad Eléctrica (CE)** por medio de la conductimetría eléctrica.

La concentración de **C** y **N** por análisis instrumental con el analizador *Shimadzu TOC 5050-A* y *Leco TruSpec® Micro* respectivamente y la **relación C/N** como lo indica su expresión.

4.2.3.2 Secuestro de carbono en bosques plantados

Los procedimientos se llevaron a cabo en el Departamento de Producción Forestal, Laboratorio de Suelos en el CUCBA, Laboratorio de biomateriales del CUCEI y Departamento de Edafología y Química Agrícola en la Universidad de Santiago de Compostela.

4.2.3.2.1 Contenido de carbono y nitrógeno en biomasa y suelo

Las muestras de biomasa y suelo fueron secadas en horno (Terlab S.A. de C.V.) a 70 ± 3 °C, molidas y tamizadas en malla 60. Se determinaron las concentraciones de C usando el analizador elemental CHSN-O Leco TruSpec® Micro (LECO Corporation).

Se pesaron 2 mg de muestras, se empaquetaron en capsulas de plata y fueron sometidas a combustión controlada en presión y enriquecida con helio a 900 °C. Una vez separados, se cuantificaron mediante un detector de absorción selectiva de infrarrojos para C, H, S, y de conductividad térmica para N en porcentaje en peso de cada elemento.

4.2.3.2.2 Secuestro de carbono en biomasa y suelo

El C almacenado en la biomasa se calculó multiplicando la *B* por las concentraciones de C derivadas del análisis elemental (Parada et al. 2010, Schelegel et al. 2001). La acumulación de C en el suelo, fue calculada

multiplicando la profundidad, densidad aparente, concentración del elemento y un aproximado del contenido de grava (Merino et al. 2005).

4.2.4 Análisis de la información

Las diferencias de crecimiento, productividad, producción de biomasa y secuestro de C entre BP y BM, fueron corroboradas por medio de la ANOVA y la prueba de comparación de medias Tukey.

La normalidad de los datos se comprobó por medio de gráficos P-P Plot, lo cual, tuvieron un comportamiento normal.

Los análisis de regresión simple permitieron construir los modelos biométricos para estimar la biomasa en las especies estudiadas. El programa estadístico utilizado para analizar los datos arrojados en la investigación, así mismo para construir las ecuaciones alométricas fue SAS v9.0 (SAS Institute 2009).

5. Resultados

5.1 Crecimiento, modelos biométricos y propiedades del suelo en bosques plantados de *Gmelina arborea*

5.1.1 Crecimiento de bosques plantados y propiedades del suelo

A 15 años de edad de haber establecido los bosques plantados, su manejo silvícola difirió notablemente en la densidad de *G. arborea* por superficie entre los bosques plantados, además, la supervivencia también fue diferente como se describió en la sección de métodos (Figura 14). El Cuadro 1, muestra el comportamiento dasométrico de BP y BM.

Haciendo referencia al promedio de árboles de *G. arborea* establecida en los modelos de plantación puro y mixto, dicha especie al crecer en BM tuvo mayor DAP (12 %) y área basal (11 %) que BP; por el contrario, la altura total fue superior en la *G. arborea* de BP, lo que se reflejó en un mayor volumen del fuste (4.5 %).

La *G. arborea* en BM representó el 39 % del volumen maderable total por superficie de la plantación al igual que *P. guachapele* (39 %), mientras que *C. alliodora* aportó un 22 % en el modelo de producción en mención.

Al comparar el volumen de madera producido en ambos bosques plantados, BM fue un 27 % ($478.5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) que BP lo cual, se sustenta por la diferenciación en el número de árboles por área entre los modelos evaluados.

Los suelos de los dos bosques plantados difirieron en algunas propiedades de su valor inicial, por ende, es asumible que dicha variación fue por el efecto de las especies arbóreas en BP y BM durante su periodo de crecimiento.

Así, los suelos del BM tuvieron un pH más favorable (6.1 a 6.5) para *G. arborea*, además de la concentración de C (1.3 a 2.6 %) y relación C:N (20 a 30) aunque, la conductividad eléctrica ($40.3 \text{ a } 43.1 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$) y concentración de N (0.07 a 0.1 %) fue más alta en los suelos del BP (Cuadros 2).

5.1.2 Modelos biométricos

Las ecuaciones alométricas propuestas para estimar la biomasa en *G. arborea*, *C. alliodora* y *P. guachapele* cumplieron con el supuesto de $r^2 \leq 1$ y $Ee \leq 1$ lo cual, se muestran en el Cuadro 3.

Los mejores valores de ajuste obtenidos para cada especie (y componente del árbol) se describen a continuación:

***G. arborea*:**

Hoja = r^2 : 0.96 y Ee : 0.53.

Ramas = r^2 : 0.97 y Ee : 0.56.

Fuste = r^2 : 0.99 y Ee : 0.15.

Raíz = r^2 : 0.81 y Ee : 1.73.

BT = r^2 : 0.99 y Ee: 0.14.

C. alliodora:

Hoja = r^2 : 0.98 y Ee: 0.32.

Ramas = r^2 : 0.99 y Ee: 0.00.

Fuste = r^2 : 0.99 y Ee: 0.16.

Raíz = r^2 : 0.99 y Ee: 0.11.

BT = r^2 : 0.99 y Ee: 0.12.

P. guachapele:

Hoja = r^2 : 0.98 y Ee: 0.30.

Ramas = r^2 : 0.99 y Ee: 0.41.

Fuste = r^2 : 0.99 y Ee: 0.12.

Raíz = r^2 : 0.99 y Ee: 0.27.

BT = r^2 : 0.99 y Ee: 0.26.

Cabe mencionar que las ecuaciones descritas en el Cuadro 3, además de ser sencillas para su aplicación práctica, tienen un 95 % de confiabilidad.

La manera correcta de su aplicación en futuros inventarios de biomasa, también dependerá de las condiciones del sitio.

Cuadro 1. Estructura forestal en bosques plantados de 15 años en el Estado de Nayarit, México (*n* = 30)

	Densidad		DAP (cm árbol ⁻¹)	Altura total (m árbol ⁻¹)	Área basal (m ² árbol ⁻¹)	Área basal (m ² ha ⁻¹)	Volumen (m ³ árbol ⁻¹)	Volumen (m ³ ha ⁻¹)
	inicial (árboles ha ⁻¹)	final (árboles ha ⁻¹)						
Vegetación	1)							
bosque plantado								
puro								
<i>G. arborea</i>	*900 ± 1.1	273 ± 1.2	30.7 ± 1.2	24.3 ± 1	0.08 ± 0.01	21.0 ± 1.6	4.7 ± 0.3	1271.1 ± 70.7
bosque plantado								
mixto								
<i>G. arborea</i>	300 ± 1.0	163 ± 1.4	35.1 ± 1.3	20.6 ± 0.5	0.1 ± 0.01	16.4 ± 1.2	4.2 ± 0.2	681.5 ± 30.7
<i>C. alliodora</i>	356 ± 12.1	190 ± 19.0	17.0 ± 0.6	15.8 ± 3.3	0.02 ± 0.002	4.7 ± 0.7	2.1 ± 0.1	391.4 ± 26.0
<i>P. guachapele</i>	455 ± 11.3	250 ± 14.8	20.0 ± 0.1	13.3 ± 4.2	0.04 ± 0.004	8.9 ± 1.2	2.7 ± 0.1	676.7 ± 27.0
Total/promedio							1749.6 ± 117.8	

Los datos son medias ± 1 Error estándar.

*La densidad inicial de árboles por hectárea tomada a partir del 81.8 % de supervivencia

Cuadro 2. Propiedades de los suelos en bosques plantados del Estado de Nayarit, México (*n* = 3)

Profun- didad (cm)	Textura	Densidad aparente (g cm ⁻³)	pH	Capacidad de		Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	C (%)	N (%)	C/N
				Intercambio	Catiónico (cmol (⁺) kg ⁻¹)				
Plantación pura									
0-15	Franco- arcilloso	1.1 ± 0.01	5.9 ±	43.1 ± 0.4		0.05 ± 0.001	2.4 ± 0.1	0.1 ± 0.004	19 ±
			0.1						0.2
15-45	Franco- arcilloso	1.1 ± 0.004	5.8 ±	40.3 ± 1.0		0.03 ± 0.004	1.4 ± 0.1	0.07 ±	19 ±
			0.1						0.003
Plantación mixta									
0-15	Franco- arcilloso	1.1 ± 0.02	6.5 ±	40.4 ± 0.4		0.04 ± 0.001	2.6 ± 0.3	0.09 ±	30 ±
			0.2						0.004
15-45	Franco- arcilloso	1 ± 0.01	6.1 ±	39.1 ± 0.9		0.04 ± 0.003	1.3 ± 0.04	0.07 ±	20 ±
			0.1						0.004

Los datos son medias ± 1 Error estándar

Cuadro 3. Modelos biométricos de biomasa para *G. arborea* ($n = 60$), *C. alliodora* ($n = 30$) y *P. guachapele* ($n = 30$)

Componente	Modelos biométricos de biomasa	r ²	Ee
<i>G. arborea</i>			
Hojas	$BH = \exp(0.469485 * \sqrt{(DAP)})$	0.963***	0.532
Ramas	$BR = \exp(0.652556 * \sqrt{(DAP)})$	0.976***	0.568
Fuste	$BF = \exp(1.72081 * \ln(DAP))$	0.998***	0.157
Raíz	$BR = (4.17202 + 0.267133 * DAP)^2$	0.818*	1.730
Biomasa Total	$BT = \exp(1.85029 * \ln(DAP))$	0.999***	0.141
<i>C. alliodora</i>			
Hojas	$BH = \exp(0.074047 * DAP)$	0.989*	0.320
Ramas	$BR = 1 / (\frac{2.01394}{DAP})$	0.999***	0.002
Fuste	$BF = \exp(1.40293 * \ln(DAP))$	0.999**	0.166
Raíz	$BR = \exp(0.667892 * \sqrt{(DAP)})$	0.991***	0.117
Biomasa Total	$BT = \exp(1.53636 * \ln(DAP))$	0.999***	0.121
<i>P. guachapele</i>			

Hojas	$BH = \exp(0.506143 * \sqrt{(DAP)})$	0.991*	0.302
Ramas	$BR = \exp(0.170481 * DAP)$	0.995*	0.415
Fuste	$BF = \exp(1.50064 * \ln(DAP))$	0.999***	0.126
Raíz	$BR = \exp(0.801425 * \sqrt{(DAP)})$	0.997***	0.272
Biomasa Total	$BT = \exp(1.07025 * \sqrt{(DAP)})$	0.999***	0.261

Peso de la biomasa seca (kg árbol⁻¹)

DAP: diámetro a la altura del pecho (cm)

Ee: error estándar

Las ecuaciones tienen un nivel de confianza de 95 %

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

5.2 Producción de biomasa y secuestro de carbono en bosques plantados de *Gmelina arborea*

5.2.1 Producción de biomasa arbórea

La mayor cantidad de biomasa por especie, se produjo en el fuste (Figura 15abc); partiendo de lo anterior, la BM presentó un 55 % más de biomasa (tanto en la parte aérea (BA), como en raíz) que BP. En BM la producción por árbol se

presenta en el siguiente orden descendente: *G. arborea* > *P. guachapele* > *C. alliodora*.

La contribución a la BT (385.2 Mg ha^{-1}) por unidad de superficie entre las especies del BM fue de la siguiente manera: *P. guachapele* ($61 \% = 233.4 \text{ Mg ha}^{-1}$) > *G. arborea* ($33 \% = 128.2 \text{ Mg ha}^{-1}$) > *C. alliodora* ($6 \% = 23.6 \text{ Mg ha}^{-1}$).

Comparando la *G. arborea* de los dos bosques plantados, ésta en BM produjo mayor cantidad de biomasa promedio árbol; siendo destacable el mayor incremento del fuste (20 %) y raíz (51 %) (Cuadro 4).

La relación raíz/BA fue 0.20 y 0.29 en BP y BM respectivamente.

Lo anterior indica que, dicho componente es la segunda fuente más importante de reserva de biomasa en los árboles, además, su incremento dependerá del modelo de plantación con (Cuadro 4).

5.2.2 Secuestro de carbono en la biomasa arbórea

Los árboles de la BM almacenaron más C (34 %) que BP. Si bien, la *G. arborea* en BM acumuló un 14 % más de C promedio árbol que en BP siendo el fuste, el principal componente de reserva y mayor representatividad (p.ej. 59.4 % en BM y 71 % en BP) en la estructura del árbol (Cuadro 4).

En términos de superficie, BM fue más eficiente en el almacenamiento de C que BP (alrededor de 37.1 Mg C ha⁻¹ de diferencia) donde la *G. arborea* representó el 53.2 % del total en el modelo de producción forestal (Cuadro 4).

5.2.3 Producción de biomasa y secuestro de carbono en mantillo

La producción de biomasa (5.7 %) y almacenamiento de C (10.9 %) en el mantillo del BM fue mayor que en BP (Cuadros 5), siendo el efecto más importante la densidad árboles por superficie lo cual, fue diferente entre los dos bosques plantados.

Cuadro 4. Producción de biomasa y secuestro de carbono en bosques plantados del Estado de Nayarit, México (*n* = 30)

Bosque plantado	Componen	Biomasa	Biomasa	C	C	C
puro	te	(kg árbol ⁻¹)	(Mg ha ⁻¹)	(%)	(kg árbol ⁻¹)	(Mg ha ⁻¹)
<i>G. arborea</i>				47.6 ±		
	Hojas	12.2 ± 1.2	3.3 ± 0.3	0.9	5.8 ± 0.6	1.6 a ± 0.2
			10.6 b ±	46.9 ±		
	Ramas	39.0 ± 4.3	1.2	1.5	18.2 ± 2.0	5.0 b ± 0.5
			105.2 ±	49.9 ±	189.6 ±	
	Fuste	385.3 ± 31.4	8.6	0.7	15.4	51.8 ± 4.2
				48.3 ±		
	Raíz	110.9 ± 7.2	30.3 ± 2.0	1.4	53.6 ± 3.5	14.6 ± 0.9
			149.4 ±		267.2 ±	73.0 ±
Total		547.1 ± 98.7	27.0		48.7	13.3
Bosque plantado						
mixto						
<i>G. arborea</i>				48.7 ±		
	Hojas	22.4 ± 1.9	3.6 a ± 0.3	0.4	10.9 ± 0.9	1.8 a ± 0.1
			10.4 b ±	46.6 ±		
	Ramas	63.5 ± 7.0	1.1	0.5	29.4 ± 0.3	4.8 b ± 0.5
				44.8 ±	212.5 ±	
	Fuste	474.9 ± 34.3	77.4 ± 5.6	1.9	15.3	34.6 ± 2.5
				46.3 ±		
	Raíz	225.9 ± 8.0	36.8 ± 1.3	0.5	104.7 ± 3.7	17.1 ± 0.6

		786.7 ±	128.2 ±		357.5 ±	
Total		118.6	19.3		52.9	59.0 ± 8.6
		48.5 ±				
<i>C. alliodora</i>	Hojas	5.8 ± 0.4	1.1 ± 0.1	0.5	2.8 ± 0.2	0.5 ± 0.03
		46.6 ±				
	Ramas	11.4 ± 0.3	2.2 ± 0.05	0.4	5.3 ± 0.1	1.0 ± 0.02
		50.4 ±				
	Fuste	82.3 ± 3.9	15.6 ± 0.7	0.1	41.6 ± 2.0	7.9 ± 0.4
		50.2 ±				
	Raíz	24.9 ± 1.0	4.7 ± 0.2	0.7	12.6 ± 0.5	2.4 ± 0.1
Total		124.4 ± 20.3	23.6 ± 3.8		62.3 ± 10.3	11.8 ± 2.0
		44.4 ±				
<i>P. guachapele</i>	Hojas	14.1 ± 0.9	3.5 a ± 0.2	0.9	6.3 ± 0.4	1.6 ± 0.1
		48.2 ±				
	Ramas	109.4 ± 12.4	27.3 ± 3.1	1.2	52.7 ± 6.0	13.2 ± 1.5
		49.5 ±				
	Fuste	137.9 ± 4.3	34.5 ± 1.1	0.3	68.3 ± 2.1	17.1 ± 0.5
		49.3 ±				
	Raíz	65.4 ± 4.4	16.3 ± 1.1	0.6	32.4 ± 2.2	8.1 ± 0.5
		233.4 ±				
Total		326.8 ± 31.2	7.8		15.5	40.0 ± 3.9
Bosque plantado		1237.9 ±	385.2 ±		579.5 ±	110.1 ±
mixto total		240.7	52.8		106.7	16.8

Los datos son medias ± 1 Error estándar

Cuadro 5. Producción de biomasa y secuestro de C del mantillo de dos bosques plantados de *G. arborea* en el Estado de Nayarit, México (*n* = 3)

	Biomasa	C	C
Bosques plantados	(Mg ha ⁻¹)	(%)	(Mg ha ⁻¹)
Puros	10.7 ± 0.8	35.4 ± 0.3	4.1 ± 0.5
Mixtos	12.0 ± 0.7	35.3 ± 0.1	5.1 ± 0.1

Los datos son medias ± 1 Error estándar

5.2.4 Secuestro de carbono en el suelo de bosques plantados

El secuestro de C en los suelos en ambos bosques plantados fue similar lo cual, coincide con sus propiedades físicas.

Sin embargo, el suelo del BM almacenó un 3.2 % más de C de 0-15 cm y, en BP (Figura 17b) se dio el mayor almacenamiento (alrededor del 2.6 %) en la profundidad de 15-45 cm (Cuadros 6).

Lo anterior, se atribuye a una mayor velocidad de descomposición de la materia orgánica y fijación de C en el modelo de BP.

Cuadro 6. Secuestro de C en los suelos de bosques plantados en el Estado de Nayarit, México (*n* = 3)

Profundidad (cm)	C (Mg ha ⁻¹)	
	Bosques plantado	Bosques plantado
	puro	mixto
0-15 40	.9 ± 0.7 4	3.6 ± 0.9
15-45 45	.1 ± 0.7 42	.8 ± 0.7
Total	86.0 ± 1.4	86.4 ± 3.3

Los datos son medias ± 1 Error estándar

6. Discusión

6.1 Estructura forestal, condiciones de sitio y ecuaciones de biomasa

Los resultados del presente estudio arrojaron importantes evidencias sobre el comportamiento de la *G. arborea* establecida en dos modelos de producción forestal siendo el BM, el más apropiado para el crecimiento de la especie.

La información dasométrica arrojada en este estudio, fueron superiores a los reportados por Onyekwelu et al. (2006) en Nigeria ($h = 20.9$ m, $DAP = 26.2$ cm, área basal = $50.5 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ y $V = 550.5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), Espinoza-Durán y Moya (2013) en Costa Rica ($h = 14.3$ a 14.9 m, $DAP = 30.9$ a 31.2 cm y $V = 240.1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$;) y Martínez-Zurimendi et al. (2015) en México ($h = 14.5$ m y $DAP = 19.3$ cm;) en bosques plantados de similar edad.

Analizando los suelos de BP y BM en términos de sus propiedades, estas coinciden con lo señalado en otras investigaciones si bien, se ha documentado en Nigeria y Costa Rica que el mejor crecimiento de la *G. arborea* se produjo en

suelos con textura franco-arcillosa, pH entre 5 – 7.5 y densidad aparente cercana a 1 g cm^{-3} (Onyekwelu et al. 2006, Adekunle et al. 2011).

Diferentes autores concuerdan que los árboles en bosques plantados comerciales crecerán defectuosamente (fustes torcidos, baja altura, exceso de ramificaciones, etc.) cuando se planta en suelos con $\text{pH} < 5$, densidad aparente superior a 1 g cm^{-3} , pocos profundos, muy húmedos, mal drenaje y poco fértiles (Onyekwelu 2001, Rojas et al. 2004, Onyekwelu et al. 2006, Adekunle et al. 2011).

También se ha corroborado que el pH tiene una relación positiva con la disponibilidad de nutrientes; entre más cercanos estén a la neutralidad, mayores elementos estarán disponibles para la planta, favoreciendo el equilibrio iónico del suelo y mineralización de la materia orgánica (Onyekwelu 2001).

Alta concentración de N en el suelo ya sea incorporada naturalmente o sintética beneficia el crecimiento de la *G. arborea*, independientemente del modelo de plantación o marco de establecimiento (Rojas et al. 2004).

Otras investigaciones confirmaron que en suelos con relación C/N > 11.5 denota la existencia de exceso de C y energía lo cual, inmoviliza el N por parte de los microorganismos impidiendo su aprovechamiento por las plantas; aunque también, dependerá de otras sinergias producidas en el suelo (Gamarra et al. 2018, Salcedo-Pérez et al. 2019).

Contrario a lo anterior, el mayor crecimiento de la *G. arborea* se dio en suelos con relación C/N > 19, asumiendo el efecto generado por la *P. guachapele* (fijación de N) en BM y su proximidad con el BP pues, la liberación del N en estos dos escenarios fue muy alta lo que explica el mayor incremento en biomasa registrado en las especies del presente estudio, siendo las hojas el componente del árbol donde más se concentra y adquiere mayor preponderancia.

Swamy et al. (2003), Ladrach (2004) y Moya et al. (2008) dijeron que las buenas prácticas silvícolas, mezclas de especies diferentes y condiciones de sitio optimizan la productividad de los modelos forestales por superficie.

Referente a las ecuaciones alométricas de biomasa propuestas esta investigación, los valores de ajuste alcanzados por componente del árbol y BT

fueron similares según Swamy et al. (2003) en la India ($r^2 = 0.97$ en hojas, $r^2 = 0.93$ en ramas, $r^2 = 0.98$ en fuste, $r^2 = 0.97$ en raíz y $r^2 = 0.97$ para la BT), Onyekwelu (2004) en Nigeria ($r^2 = 0.97$, 0.98 y 0.98 ; hojas, ramas y fuste respectivamente) y Arias et al. (2011) en Costa Rica ($r^2 = 0.97$, 0.92 y 0.99 ; para hojas, ramas y fuste respectivamente).

Basados en lo anterior, Chaturvedi y Raghubanshi (2015) y Ruiz-Blandon et al. (2019) manifestaron que las mediciones directas de biomasa, permiten elaborar ecuaciones de mayor valor de ajuste y confiabilidad que las generadas a partir de mediciones indirectas.

Las ecuaciones construidas en este trabajo, serán de gran utilidad en futuras investigaciones direccionadas al inventario de biomasa en *G. arborea*, *C. alliodora* y *P. guachapele* siempre y cuando se apliquen en condiciones de sitio similares al presente estudio.

Las ecuaciones alométricas por componente, permitirán cuantificar con certeza la distribución del C en el árbol durante su crecimiento pues que, valores de ajuste superiores a 0.9 te darán menos incertidumbre sobre la existencia real de

biomasa predilecta en un árbol durante su crecimiento teniendo en cuenta su edad.

Por otro lado, estimar la biomasa radicular y su impacto en la BT de los árboles constituye un importante aporte en estudios de C pues, este componente contribuye en más del 20 % de la BT del árbol, no obstante, rara vez se considera en los inventarios debido a su complejidad en el procesamiento.

6.2 Valoración de la biomasa y carbono en bosques plantados comerciales

El ámbito forestal, el establecimiento de bosques plantados comerciales con especies de rápido crecimiento, siguen siendo una alternativa atractiva y sustentable tanto económica como ambiental.

En la presente investigación, se corroboró que la *G. arborea* establecida en BM, produce mayor cantidad de biomasa por componente (hojas, ramas, fuste, raíz y BT).

Si bien, los valores reportados en el presente trabajo en BP, difieren significativamente a lo señalado en bosques plantados de 15 años de edad establecidas en Filipinas y Nigeria en 142.1 y 233.7 Mg ha⁻¹ respectivamente (Sales et al. 2005, Onyekwelu et al. 2006) posiblemente, la densidad final de árboles por superficie entre los bosques plantados cotejados condicionó dicho aspecto.

Sin embargo, la producción de biomasa en bosques plantados de *G. arborea* suele afectarse por aspectos fisiológicos de la planta, manejo silvícola, modelo de plantación y la edad (Rasineni et al. 2011, Verma et al. 2017).

Independientemente del tipo de plantación, el componente del árbol que mayor aporta en la BT es el fuste (alrededor del 60%) siendo sustentado por Swamy y Puri (2005), Arias et al. (2011), Cook et al. (2014), Verma et al. (2017) y Goussanou et al. (2018) lo cual, coincide con lo documentado en el presente trabajo.

También existen evidencias científicas donde se demuestra que el manejo inadecuado de especies integradas en modelos de bosques plantados mixtos, impactará negativamente en los rendimientos en biomasa del sistema, debido a la sobrepoblación de árboles por superficie además del ritmo desigual en crecimiento (Redondo-Brenes y Montagnini 2006).

La producción de biomasa en *C. alliodora* y *P. guachapele* en esta investigación fueron consideradas deficientes. Por ende, no es apropiado asociar más de dos especies de rápido crecimiento en una misma área, aunque; si es factible realizar mezclas con árboles fijadores de N (Redondo-Brenes y Montagnini 2006) siempre y cuando sea factible para potenciar el crecimiento de la especie de interés comercial en este caso la *G. arborea*.

Dentro de los bosques plantados, también el mantillo es una fuente importante de biomasa necrosada, componiéndose principalmente de hojas (89 %), corteza (8.2 %) y otros restos orgánicos (2.8 %), aumentando su cantidad según la época del año (mayormente en la seca), edad de los bosques plantados y humedad del suelo (Stanley y Montagnini 1999, Agus 2001, Agus et al. 2004, Takahashi et al. 2012).

Las aportaciones de biomasa del mantillo en BP y BM fueron inferiores al 10%. La disponibilidad de información con respecto al mantillo a la edad evaluada es limitada, no obstante, los valores de la presente investigación superan lo reportado por Agus (2001) (8.8 Mg ha^{-1} bosques plantados de 8 años en Indonesia), Lodhiyal y Lodhiyal (2003) (5.4 Mg ha^{-1} bosques plantados de *Dalbergia sissoo* en la India) y Takahashi et al. (2012) (2.2 Mg ha^{-1} BM de *T. grandis* - *G. arborea* en Tailandia a la edad de 15 años).

Respecto al C almacenado en la biomasa arbórea, las diferencias entre las *G. arborea* de los dos bosques plantados (BP = $267 \text{ kg de C árbol}^{-1}$ y BM = $357 \text{ kg de C árbol}^{-1}$) y los modelos en general (BP = 73 Mg ha^{-1} y BM = 110 Mg ha^{-1}) fueron considerables.

Sin embargo, difieren de lo cuantificado por Sales et al. (2005) en Filipinas (63.9 Mg ha^{-1}) y Takahashi et al. (2012) en Tailandia ($93.5 \text{ Mg C ha}^{-1}$) en bosques plantados de 15 años de edad.

La biomasa radical es una fuente importante de almacenamiento de C. Los estudios antes mencionados, señalaron que las raíces proporcionan menos del 20 % del C acumulado en la BT; aunque en los bosques plantados evaluada su contribución fue alrededor del 25 %.

Swamy et al. (2008), Vanlalngurzauva et al. (2010), Allen et al. (2010), Rasineni et al. (2011), Verma et al. (2017) postularon que la acumulación de C en bosques plantados puede afectarse por efectos del manejo silvícola y factores ambientales propios del área de estudio.

Esta investigación pudo constatar que la estrategia de *G. arborea* para optimizar la captura de C en modelos mixtos de plantación, se basa en aumentar con mayor rapidez el tamaño de la copa y biomasa radical que sus competidores.

En ese sentido, Redondo-Brenes y Montagnini (2006) y Forrester et al. (2005) expresaron que un mayor volumen de raíces aumenta las posibilidades de alcanzar los nutrientes disponibles y más alejados de la planta; a su vez, cuanto más grande sea la copa, más luz captará el árbol (mayor área fotosintética) siendo este proceso indispensable para su crecimiento e incremento en biomasa.

El mantillo también es un componente importante de retención de C en bosques plantados, aunque representa menos del 10% en estos sistemas.

A pesar de haber sido mayor en BM que en BP, estos valores fueron similares a los calculados por Agus (2001) en Indonesia (5.0 Mg ha^{-1}) en bosques plantados de 8 años, pero superiores al ser comparados con Kraenzel et al. (2003) (3.6 Mg ha^{-1}) en bosques plantados de *T. grandis* de 20 años en Panamá y, Mbaekwe y Mackenzie (2008) (2.2 Mg ha^{-1}) en bosques plantados de *T. grandis* de 14 años en Nigeria.

En este estudio, la concentración de C y su respectivo almacenamiento en los suelos estudiados, no difirieron significativamente debido a su similitud en propiedades físicas y contigüidad, por ende, gran parte de ese C se registró en la biomasa.

Los valores de C registrados en esta investigación concuerdan con los informes divulgados en otros sitios (González-Molina et al. 2008, Ramachandran et al. 2009, Almeida et al. 2010, Saha et al. 2012, Nanko et al. 2014, Walter et al. 2016).

Según Polglase et al. (2000) y Resh et al. (2002) la edad de los árboles no es un factor que determine el secuestro de C del suelo.

Al comparar los resultados del presente estudio con otros trabajos las diferencias fueron notables, tal como Sales et al. (2005) en Filipinas (61.3 Mg ha^{-1}), Cook et al. (2014) en Brasil (43.9 Mg ha^{-1}) y Anikwe (2010) en Nigeria (63.8 Mg ha^{-1}) en bosques plantados de 30 años.

7. Conclusiones

En el aspecto dasométrico, el mayor incremento en DAP y área basal se dio *G. arborea* establecida en el modelo mixto lo cual, es un hallazgo sumamente importante en el manejo de la *G. arborea* con fines comerciales y ambientales.

Además, los resultados del presente estudio indicaron que el éxito de los modelos de producción mixto en términos de productividad dependerá en mayor medida, en la incorporación de leguminosas en el sistema y su respectivo manejo silvícola.

Las ecuaciones alométricas para estimar la biomasa de *G. arborea*, *C. alliodora* y *P. guachapele* propuestas en este trabajo, tuvieron valores de ajustes dentro del rango reportado por otros autores, además del 95 % de fiabilidad, por consiguiente, deberán ser consideradas en estudios de biomasa para la especie en mención siempre y cuando las condiciones de sitio fuesen similares al presente estudio.

Incluir una especie leguminosa (*P. guachapele*) en BM aumentó el contenido de N en ese modelo de plantación, por ende, benefició la producción de biomasa y almacenamiento de C por componente de la *G. arborea* y el sistema en general.

Alta densidad del BM con respecto al BP, también fue un factor que favoreció la eficiencia en la captura de C en este sistema. Sin embargo, la biomasa del mantillo en BM también fue más abundante que en BP lo cual, acumuló mayor cantidad de C superficie.

Estas diferencias fueron sustentadas por la contribución en biomasa de las tres especies del modelo mixto y su correspondiente densidad por área. El segundo mayor soporte de C en los bosques plantados es el suelo.

Sin embargo, al comparar los suelos del BP y BM a diferentes profundidades no presentaron diferencias significativas puesto que, comparte similares propiedades, además de estar ubicados bajo las mismas condiciones de sitio y edad, por tanto, el almacenamiento de C dependerá de la densidad aparente y concentración de C.

8. Referencias

- Adekunle, V. A. J., Alo, A.A., and Adekayode, F.O. 2011. Yields and nutrient pools in soils cultivated with *Tectona grandis* and *Gmelina arborea* in Nigerian rainforest ecosystem. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 10(2):127-135.
- Agus, C. 2001. Net primary production and nutrient absorption of fast growing *Gmelina arborea* Roxb. (yemane) at tropical plantation forests. *Indonesian Journal of Agricultural Sciences* 1(2):46-52.
- Agus, C., Karyanto, O., Kita, S., Haibara, K., Toda, H., Hardiwinoto, S., Supriyo, H., Na'lem, M., Wardana, W., Sipayung, M.S., Atun, H., and Wijoyo, S. 2004. Sustainable site productivity and nutrient management in a short rotation plantation of *Gmelina arborea* in East Kalimantan, Indonesia. *New Forest* 28:277–285.
- Allen, C.D., Macalady, A.K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D.D., and Hogg, E.H. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management* 259(4):660-684.

- Almeida, E.M., Júnior, J. H. C., y Finger, Z. 2010. Determinação do estoque de carbono em teca (*Tectona grandis* LF) em diferentes idades. *Ciência Florestal* 20:559-568.
- Anikwe, M.A. 2010. Carbon storage in soils of Southeastern Nigeria under different management practices. *Carbon balance and management* 5(1):1-7.
- Arias, D., Calvo, A., Richter, D., and Dohrenbusch, A. 2011. Productivity, aboveground biomass, nutrient uptake and carbon content in fast-growing tree plantations of native and introduced species in the Southern Region of Costa Rica. *Biomass and bioenergy* 35:1779-1788.
- Arteaga, M.B. y, Castelán, L.M. 2008. Evaluación dasométrica temprana de una plantación agroforestal de tres especies introducidas, en el municipio de Huehuetla, Hidalgo. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 14(2):105-111.
- Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests. Roma. Italy. Forestry paper. 135 p.

- Cancino, J. 2006. Dendrometría Básica. Proyecto de Desarrollo de la Docencia. Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Concepción. 163 p.
- Chaturvedi, R.K., and Raghubanshi, A.S. 2015. Assessment of carbon density and accumulation in mono-and multi-specific stands in Teak and Sal forests of a tropical dry region in India. *Forest Ecology and Management* 339:11-21.
- CONABIO-PRONARE. 2006. SIRE: Paquetes tecnológicos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad-Programa Nacional de Reforestación. *Gmelina arborea*. 6 p.
- CONAFOR. 2012. Programa de Desarrollo de Plantaciones Forestales Comerciales, a 15 Años de su Creación. Zapopan, Jalisco, México. Comisión Nacional Forestal. 152 p.
- CONAFOR. 2000. *Gmelina arborea* Roxb. SIRE: CONABIO-SEMARNAT. Paquetes tecnológicos. México. Comisión Nacional Forestal. 6 p.
- CONAFOR. 2013. Evaluación de la situación actual de proyectos de Plantaciones Forestales Comerciales finiquitados. México. Comisión Nacional Forestal. 74 p.

- Cook, R.L., Binkley, D., Mendes, J. C. T., and Stape, J.L. 2014. Soil carbon stocks and forest biomass following conversion of pasture to broadleaf and conifer plantations in southeastern Brazil. *Forest Ecology and Management* 324:37-45.
- Corona-Núñez, R.O., Campo, J., and Williams, M. 2018. Aboveground carbon storage in tropical dry forest plots in Oaxaca, Mexico. *Forest Ecology and Management* 409:202-214.
- Davidse, G., Sousa, M., Knapp, S., and Chiang, C. 2012. Rubiaceae a Verbenaceae. In G. Davidse, M. Sousa-Sánchez, S. Knapp and F. Chiang-Cabrera (eds.) *Fl. Mesoamer.* Missouri Botanical Garden, St. Louis 4(2):1–533.
- Dhakulkar, S., Ganapathi, T.R., Bhargava, S., and Bapat, V.A. 2005. Induction of hairy roots in *Gmelina arborea* Roxb. and production of verbascoside in hairy roots. *Plant science* 169(5):812-818.
- DOF. 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios,

muestreo y análisis. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. Diario Oficial de la Federación. 85 p.

Dudhane, M.P., Borde, M.Y., Jite, P.K. 2011. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and antioxidant activity in *Gmelina arborea* Roxb. under salt stress condition. *Notulae Scientia Biologicae* 3(4):71-78.

Dvorak, W.S. 2004. World view of *Gmelina arborea*: opportunities and challenges. *New Forests* 28:111-126.

Espinoza-Durán, J., y Moya, R. 2013. Aprovechamiento e industrialización de dos plantaciones de *Gmelina arborea* de 15 años de edad en diferentes condiciones de pendiente. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 19(2):237-248.

FAO. 2008. Base referencial mundial del recurso suelo. Un marco conceptual para clasificación, correlación y comunicación internacional. Roma, Italia. Organización de las Naciones Unidas de la Alimentación y la Agricultura. 117 p.

FAO y PNUMA. 2020. El estado de los bosques del mundo 2020. Los bosques, la biodiversidad y las personas. Roma, Italia. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. 222 p.

FAO. 2017. Plantaciones forestales: Relación con el incremento medio anual de plantaciones. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Disponible en: <http://www.fao.org/3/y1997s/y1997s09.htm>. Fecha de consulta: 7/enero/2021

FAO. 2017. Soil Organic Carbon: the hidden potential. Rome. Italy. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 90 p.

Forrester, D.I., Bauhus, J., and Cowie, A.L. 2005. On the success and failure of mixed-species tree plantations: lessons learned from a model system of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. *Forest Ecology and Management* 209:147– 155.

Forrester, D.I., Pares, A., O'hara, C., Khanna, P.K., and Bauhus, J. 2013. Soil organic carbon is increased in mixed-species plantations of *Eucalyptus* and nitrogen-fixing *Acacia*. *Ecosystems* 16(1):123-132.

- Gamarra, C., Díaz-Lezcano, M., Vera de Ortiz, M., Galeano, M., y Cabrera-Cardús, A. 2018. Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales* 9(46):4-25.
- García, E. 1987. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana) 4a. México. Offset Larios. 219 p.
- Gómez-García, E., y Pérez-Rodríguez, F. 2015. Evolución de la biomasa y del carbono acumulado por *Quercus robur* en Galicia (España). *Bosque* 36:255-264.
- González-Molina, L., Etchevers-Barra, J.D. y Hidalgo-Moreno, C. 2008. Carbono en suelos de ladera: factores que deben considerarse para determinar su cambio en el tiempo. *Agrociencia* 42(7):741-751.
- González, J.M., y Gómez, G.L. 2015. Efecto invernadero y cambio climático: antecedentes, situación actual y perspectivas. España. Repositorio abierto de la Universidad de Cantabria. 38 p.

Goussanou, C.A., G uendehou, S., Assogbadjo, A.E., and Sinsin, B. 2018. Application of site-specific biomass models to quantify spatial distribution of stocks and historical emissions from deforestation in a tropical forest ecosystem. *Journal of Forestry Research* 29(1):205-213.

GRIN (2018)a. National Plant Germplasm System: Taxonomy for plants resources. Information network. Taxon: *Gmelina arborea* Roxb. <https://npgsweb.ars-grin.gov/gringlobal/taxonomydetail.aspx?id=17827>. Recuperado el 15 Feb 2018.

GRIN (2018)c. National Plant Germplasm System: Taxonomy for plants resources. Information network. Taxon: *Pseudosamanea guachapele* (Kunth) Harms. <https://npgsweb.ars-grin.gov/gringlobal/taxonomydetail.aspx?id=405172>. Recuperado el 15 Feb 2018.

GRIN (2018b). National Plant Germplasm System: Taxonomy for plants resources. Information network. Taxon: *Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken. <https://npgsweb.ars-grin.gov/gringlobal/taxonomydetail.aspx?11470>. Recuperado el 15 Feb 2018.

Grünewald CF, Chapuli E, y A. Palanca. 2014. Producción industrial de biomasa de micro algas. Una salida energética a la crisis alimentaria, energética y medioambiental. España. Instituto Tecnológico del Plástico (AIMPLAS). 62-66 pp.

Hernández, M.E. 2010. Suelos de humedales como sumideros de carbono y fuentes de metano. *Terra Latinoamericana* 28(2):139-147.

Ibrahim, M., Chacón, M., Cuartas, C., Naranjo, J., Ponce, G., Vega, P., y Rojas, J. 2007. Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. *Agroforestería en las Américas* 45:27–36.

INEGI. 2017. Anuario estadístico y geográfico de Nayarit. México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 469 p.

INECC. 2018. Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015 (INEGYCEI). México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. 558 p.

IPCC. 2007. Panel Intergubernamental sobre cambio climático. Climate Change 2007: The Scientific Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Alley, R., Berntsen, T., Bindoff, N., Chen, Z., Chidthaisong, A., Friedlingstein, P., Gregory, J. Paris. France. This Summary for Policymakers was formally approved at the 10th Session of Working Group I of the IPCC. 18 p.

Jaramillo VJ. 2004. El Ciclo Global del Carbono. Una Visión desde México 1a Ed. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México Instituto Nacional de Ecología. 76-85 pp.

Jiménez PLP. 2016. El cultivo de la Melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en el trópico. Ecuador, Sangolquí. Editorial Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. 125 p.

Kaul, M., Mohren, G. M. J., and Dadhwal, V.K. 2010. Carbon storage and sequestration potential of selected tree species in India. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 15:489–510.

- Keenan, T.F., Hollinger, D.Y., Bohrer, G., Dragoni, D., Munger, J.W., Schmid, H.P., Richardson, A.D. 2013. Increase in forest water-use efficiency as atmospheric carbon dioxide concentrations rise. *Nature* 499(7458):324-327.
- Keleş, S., Durusoy, İ., and Çakir, G. 2017. Analysis of the changes in forest ecosystem functions, structure and composition in the Black Sea region of Turkey. *Journal of Forestry Research* 28(2):329-342.
- Kraenzel, M., Castillo, A., Moore, T. and Potvin, C. 2003. Carbon storage of harvest age teak (*Tectona grandis*) plantations, Panama. *Forest Ecology and Management* 173:213–225.
- Ladrach, W.E. 2004. Harvesting and comparative thinning alternatives in *Gmelina arborea* plantations. *New forests* 28(2-3):255-268.
- Lodhiyal, N., and Lodhiyal, L.S. 2003. Biomass and net primary productivity of Bhabar Shisham forests in central Himalaya, India. *Forest Ecology and Management* 176(1-3):217-235.

- Macías, F. 2004. Sumideros de carbon para el forzamiento climático Antropoceno: una visión de alternativas de actuación desde la ciencia del suelo. *Edafología* 11:7-25.
- Martínez-Zurimendi, P., Domínguez-Domínguez, M., Juárez-García, A., López-López, L.M., De la Cruz-Arias, V., y Álvarez-Martínez, J. 2015. Índice de sitio y producción maderable en plantaciones forestales de *Gmelina arborea* en Tabasco, México (Ensayo). *Revista Fitotécnica Mexicana* 38:415–425.
- Mbaekwe, E.I., and Mackenzie, J.A. 2008. The use of a best-fit allometric model to estimate aboveground biomass accumulation and distribution in an age series of teak (*Tectona grandis* L.f.) plantations at Gambari Forest Reserve, Oyo State, Nigeria. *Tropical Ecology* 49:259-270.
- McMahon, S.M., Parker, G.G., and Miller, D.R. 2010. Evidence for a recent increase in forest growth. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107(8):3611-3615.
- Merino, A., Balboa, M.A., Soalleiro, R.R., and González, J.Á. 2005. Nutrient exports under different harvesting regimes in fast-growing forest plantations in southern Europe. *Forest Ecology and Management* 207(3):325-339.

- Montero G, R Ruiz-Peinado y M. Muñoz. 2005. Producción de biomasa y fijación de CO₂ por parte de los bosques españoles. España. Monografías INIA: Serie Forestal. 13-270 pp.
- Moya, R. 2001. Estudio de las propiedades anatómicas, físicas y mecánicas de la madera de melina (*Gmelina arborea*) creciendo en Costa Rica. Desde el Bosque. Órgano informativo oficial de la Cámara. *Costarricense Forestal* 3(9):22-27.
- Moya, R. 2004. *Gmelina arborea* au Costa Rica. *Bois & Forets Des Tropiques* 279(279):47-57.
- Moya, R., Araya, L., y Vilchez, B. 2008. Variation in the pith parameter of *Gmelina arborea* trees from fast growth plantations in Costa Rica. *Annals of forest science* 65(6):612-612.
- Muñoz-Acosta, F., y Berrocal-Jiménez, A. 2012. Secado experimental de *Gmelina arborea* Roxb. proveniente de la Zona Atlántica de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 2(4):1-15.

- Muñoz, H.J., Coria, V.M., García, J.J., y Balam, M. 2009. Evaluación de una plantación de tres especies tropicales de rápido crecimiento en Nuevo Urecho, Michoacán. *Revista Ciencia Forestal en México* 34(106):61–87.
- Nanko, K., Ugawa, S., Hashimoto, S., Imaya, A., Kobayashi, M., Sakai, H., Ishizuka, S., Miura, S., Tanaka, N., Takahashi, M., and Kaneko, S. 2014. A pedotransfer function for estimating bulk density of forest soil in Japan affected by volcanic ash. *Geoderma* 213:36–45.
- Odum, E.P. 1969. The strategy of ecosystem development. *Science* 164(3877):262-270.
- Olmedo, E. J. P., López, J. C. L., Moreno, P.Z., y De La Cruz, J.M. 2015. Zonificación ecológica de *Pinus oaxacana* Mirov y aplicación de modelos de simulación del efecto del cambio climático. *Revista Mexicana de Agroecosistemas* 2:29-39.
- Onyekwelu, J.C. 2001. Growth characteristics and management scenarios for plantation-grown *Gmelina* and *Nauclea* in SW Nigeria. Munich. Germany. Hieronymus Verlag. 196 p.

- Onyekwelu, J.C. 2004. Above-ground biomass production and biomass equations for even-aged *Gmelina arborea* (ROXB) plantations in south-western Nigeria. *Biomass and Bioenergy* 26(1):39-46.
- Onyekwelu, J.C., Mosandl, R., and Stimm, B. 2006. Productivity, site evaluation and state of nutrition of *Gmelina arborea* plantations in Oluwa and Omo forest reserves, Nigeria. *Forest Ecology and Management* 229(1-3):214-227.
- Pan, Y., Birdsey, R.A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P.E., Kurz, W.A., Phillips, O.L., Shvidenko, A., Lewis, S.L., Canadell, J.G., Ciais, P., Jackson, R.B., Pacala, S.W., A. McGuire, D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S., and Hayes, D. 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 333(6045):988-993.
- Parada, S.B., Gallégo, R.A., Velázquez, M.A., y Hernández, Á.E. 2010. Guía para la medición de biomasa en plantaciones forestales de teca (*Tectona grandis* L.f.) y cedro (*Cedrela odorata* L.) para determinar su potencial de captura de carbono. Zapopan. Jalisco. México. CUCBA. Departamento Forestal. Universidad de Guadalajara. 52 p.

Paul, E. 2014. Soil microbiology, ecology and biochemistry. San Diego. California. Academic Press. 598 p.

Pellat F, J González, M. B. azan y Saynes V. 2013. Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2013. En Cámara-Cabrales L del C., C Arias-Montero, JL Martínez-Sánchez, O Castillo-Acosta eds 2013: Carbono almacenado en selva mediana de *Quercus oleoides* y plantaciones de *Eucaliptus urophylla* y *Gmelina arborea* en Huimanguillo, Tabasco. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, México. Colegio de Postgraduados, Universidad Autónoma de Chapingo, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. 249-262 pp.

Polglase, P.J., Paul, K.I., Khana, P.K., Nyakuengana, J.G., O'Connell, A.M., Grove, T.S., and Battaglia, M. 2000. National carbon accounting system. Technical Report 20, Change in Soil Carbon Following Afforestation and Reforestation. Australian. The Australian Greenhouse Office. 102 p.

Popkin, G. 2015. The hunt for the world's missing carbon. *Nature* 523(7558):20-2.

- Ramachandran, N. P.K., Kumar, M.B., and Nair, V.D. 2009. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 172 (1):10–23.
- Rasineni, G.K., Guha, A., and Reddy, A.R. 2011. Responses of *Gmelina arborea*, a tropical deciduous tree species, to elevated atmospheric CO₂: Growth, biomass productivity and carbon sequestration efficacy. *Plant science* 181(4):428-438.
- Redondo-Brenes, A., and Montagnini, F. 2006. Growth, productivity, aboveground biomass, and carbon sequestration of pure and mixed native tree plantations in the Caribbean lowlands of Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 232(1-3):168-178.
- Resh, S.C., Binkley, D., and Parrotta, J.A. 2002. Greater soil carbon sequestration under nitrogen-fixing trees compared with Eucalyptus species. *Ecosystems* 5:217– 231.
- Rojas, F., Arias, D., Moya, R., Meza, A., Murillo, O., y Arguedas, M. 2004. Manual para productores de melina (*Gmelina arborea*) en Costa Rica: Botánica y

ecología. Cartago, Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR).
83 p.

Ruiz-Blandon, B.A., Hernández-Álvarez, E., Salcedo-Pérez, E., Rodríguez-Macías, R., gallegos-Rodríguez, A., Valdés-Velarde, E., y Sánchez-Hernández, R. 2019. Almacenamiento de carbono y caracterización lignocelulósica de plantaciones comerciales de *Tectona grandis* L.f. en México. *Colombia Forestal* 22(2):15-29.

Saha, R., Chaudhary, R.S., and Somasundaram, J. 2012. Soil health management under hill agroecosystem of North East India. *Applied and Environmental Soil Science* 1-9.

Salcedo-Pérez, E., Ruiz-Blandon, B.A., Hernández-Álvarez, E., González-Cruz, R., Bernabé-Antonio, A., Orozco-Guareño, E., Ramírez-López, C.B., Hernández, J.A., and Delgado-Fornué, E. 2019. Soil properties and nitrogen as indicators of growth in teak commercial stands. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 10(52):33-54.

Sales, R.F., Lasco, R.D., and Banaticla, M.R. 2005. Carbon storage and sequestration potential of smallholder tree farms on Leyte Island, the

Philippines. In A CIAR Smallholder Forestry Project-Redevelopment of a Timber Industry Following Extensive Land Clearing: Proceedings from the End-of-Project Workshop. 129-141 pp.

SAS Institute Inc. (2009). SAS. Statistical Analysis System. Cary, NC, USA.

Schelegel, B., Gayoso, J., y Guerra, J. 2001. Manual de procedimientos de muestreo de biomasa forestal. Medición de la capacidad de captura de carbono en los bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Proyecto FONDEF. Chile. Universidad Austral de Chile. 15 p.

Schlegel, B. 2001. Estimaciones de biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempreverde. En Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Chile. Universidad Austral de Chile. 13 p.

Schmidt, M.W., Torn, M.S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I.A., Kleber, M., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Manning, D.A., Nannipieri, P., Rasse, D.P., Weiner, S., and Trumbore, S.E. 2011. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature* 478:49–56.

- Segura, M., y Andrade, H. 2008. ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes? *Revista Agroforestería de las Américas* 46:89-96.
- SEMARNAT. 2016. Anuario estadístico de la producción forestal 2016. México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 228 p.
- Soil Taxonomy. 2014. Keys to soils taxonomy. Twelfth Edition. United States Department of Agriculture (USDA). USA. Natural Resources Conservation Services (NRCS). 332 p.
- Stanley, W.G., and Montagnini, F. 1999. Biomass and nutrient accumulation in pure and mixed plantations of indigenous tree species grown on poor soils in the humid tropics of Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 113(1):91-103.
- Swamy, S.L., and Puri, S. 2005. Biomass production and C-sequestration of *Gmelina arborea* in plantation and agroforestry system in India. *Agroforestry systems* 64(3):181-195.

- Swamy, S.L., Bharitya, J.K., and Alka, M. 2008. Growth, biomass, nutrient storage and crop productivity under different tree spacings of *Gmelina arborea* in agrisilviculture system. *Indian Journal of Agroforestry* 10(2):3-9.
- Swamy, S.L., Puri, S., and Singh, A.K. 2003. Growth, biomass, carbon storage and nutrient distribution in *Gmelina arborea* Roxb. stands on red lateritic soils in central India. *Bioresource technology* 90(2):109-126.
- Takahashi, M., Marod, D., Panuthai, S., and Hirai, K. 2012. Carbon cycling in teak plantations in comparison with seasonally dry tropical forests in Thailand, in: Forest Ecosystems – More than Just Trees (eds): Blanco, J.A., InTech, Rijeka, Croatia. 209–230.
- Thévenot, M., Dignac, M.F., and Rumpel, C. 2010. Fate of lignins in soils: a review. *Soil Biology and Biochemistry* 42: 1200-1211.
- Valdés, R.M. 2011. El cambio climático y el estado simbiótico de los árboles del bosque. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(5):5-13.

- Vanclay, J.K., Baynes, J., and Cedamon, E. 2008. Site index equation for smallholder plantations of *Gmelina arborea* in Leyte Province, the Philippines. *Small-scale Forestry* 7(1):87-93.
- Vanlalngurzauba, T., Dhara, P.K., Banerjee, H., and Maiti, S. 2010. Growth and productivity of different intercrops grown under gamhar (*Gmelina arborea*) based agroforestry system. *Indian Journal of Agroforestry* 12(1):105-108.
- Verma, P., Bijalwan, A., Shankhwar, A.K., Dobriyal, M.J., Jacob, V., and Rathau, S.K. 2017. Scaling up an Indigenous Tree (*Gmelina arborea*) Based Agroforestry Systems in India. *International Journal of Science and Qualitative Analysis* 3(6):73-77.
- Walter, K., Don, A., Tiemeyer, B., and Freibauer, A. 2016. Determining soil bulk density for carbon stock calculations: A Systematic Method Comparison. *Soil Science Society of America Journal* 80(3):579-591.
- Watzlawick L, C Sanquetta, A De Mello y J. Arce. 2001. Ecuaciones de biomasa aérea en plantaciones de *Araucaria angustifolia* en el sur del estado de Paraná, Brasil. Chile. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. 1-10 pp.

Publisher: Eliva Press Global Ltd

Email: info@elivapress.com

e-version

All rights reserved.

Eliva Press is an independent international publishing house established for the publication and dissemination of academic works all over the world. Company provides high quality and professional service for all of our authors.

Our Services:

Free of charge, open-minded, eco-friendly, innovational.

- Free standard publishing services (manuscript review, step-by-step book preparation, publication, distribution, and marketing).
- No financial risk. The author is not obliged to pay any hidden fees for publication.
- Editors. Dedicated editors will assist step by step through the projects.
- Money paid to the author for every book sold. Up to 50% royalties guaranteed.
- ISBN (International Standard Book Number). We assign a unique ISBN to every Eliva Press book.
- Digital archive storage. Books will be available online for a long time. We don't need to have a stock of our titles. No unsold copies. Eliva Press uses environment friendly print on demand technology that limits the needs of publishing business. We care about environment and share these principles with our customers.
- Cover design. Cover art is designed by a professional designer.
- Worldwide distribution. We continue expanding our distribution channels to make sure that all readers have access to our books.
- Marketing tools. We provide marketing tools such as banners, paid advertising, social media promotion and more.