



## ESTIMACIÓN E INVENTARIO DE BIOMASA Y CARBONO DEL BAMBÚ NATIVO *Guadua aculeata* Rupr. EN PUEBLA, MÉXICO †

[ESTIMATION AND INVENTORY OF BIOMASS AND CARBON OF NATIVE BAMBOO *Guadua aculeata* Rupr. IN PUEBLA, MEXICO]

Casimiro Ordóñez-Prado<sup>1\*</sup>, Juan Carlos Tamarit-Urias<sup>1</sup>,  
Enrique Buendía-Rodríguez<sup>2</sup> and Gabriela Orozco-Gutiérrez<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Golfo Centro. Campo Experimental San Martinito. Carretera Federal México-Puebla km 56.5, 74100 Tlahuapan, Puebla, México. Email: prado.forestry@gmail.com; tamarit.juan@inifap.gob.mx

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Centro. Campo Experimental Valle de México. Carretera Texcoco-Los Reyes km 13.5, 56250 Coatlinchán, Texcoco, Estado de México, México. Email: buendia.enrique@inifap.gob.mx

<sup>3</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Pacífico Centro. Campo Experimental Tecomán. Carretera Colima- Manzanillo km 35, 28100 Tecomán, Colima, México. Email: orozco.gabriela@inifap.gob.mx

\*Corresponding author

### SUMMARY

**Background.** Bamboo forests are an alternative to mitigate the effects of climate change, due to the high growth rate, however, in Mexico there are few studies on its biomass and carbon storage. **Objective.** Estimate and inventory the biomass and carbon stored in stands of *G. aculeata* Rupr. in forest management unit numbered 2103, Puebla, Mexico. **Methodology.** The biomass and necromass were sampled through square sites of 100 m<sup>2</sup>, the normal diameter at 1.30 m of all the culms present in each site was measured, the litter present in 1 m<sup>2</sup> was weighed and samples were taken to determine the carbon content in culm, branches, leaves, roots, and litter. An analysis of variance and a Tukey's means comparison test were carried out. **Results.** It was determined that dry base total biomass was on average 308.05 ± 10.13 Mg ha<sup>-1</sup>, of which 139.09 ± 6.81 Mg ha<sup>-1</sup> correspond to stored carbon; in the study area 19,714.91 ± 61.87 t of dry base biomass and 8,901.63 ± 435.78 of stored carbon were estimated. Fixed carbon was 46 ± 0.4%, 44 ± 0.4%, 42 ± 0.2%, 42 ± 0.5% and 38 ± 1.0% for culms, branches, foliage, roots, and litter, respectively; carbon being different in culm and branches with the content found in foliage, root, and litter. **Implications.** Although the contribution of branches, foliage and litter was low, these are the most dynamic structural components and represent the photosynthetic machinery for biomass production. **Conclusions.** The natural forests of *G. aculeata* Rupr. have a high carbon content like that of tree species, so it is advisable to conserve them and establish forest plantations that allow a sustained carbon capture over time.

**Key words:** Carbon storages; *Guadua* bamboo; quantification by structural component; aboveground and below-ground carbon.

### RESUMEN

**Antecedentes.** Por la alta tasa de crecimiento, los bosques de bambú son una alternativa para mitigar los efectos de cambio climático, sin embargo, en México son escasos los estudios sobre su biomasa y almacenamiento de carbono. **Objetivo.** Estimar e inventariar la biomasa y carbono almacenado en rodales de *G. aculeata* Rupr. en la unidad de manejo forestal con número de identificación 2103 en Puebla, México. **Metodología.** Se realizó un muestreo de biomasa y necromasa mediante sitios de muestreo de 100 m<sup>2</sup>, se midió el diámetro a 1.30 m de altura de todos los culmos presentes en cada sitio, se pesó la hojarasca presente en 1 m<sup>2</sup> y se tomaron muestras para determinar el contenido de carbono en culmo, ramas, hojas, raíz y hojarasca. Se realizaron un análisis de varianza y una prueba de comparación de medias de Tukey. **Resultados.** Se determinó que la biomasa base seca total fue en promedio de 308.05

† Submitted May 20, 2021 – Accepted January 27, 2022. <http://doi.org/10.56369/tsaes.3787>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

ORCID: C. Ordóñez-Prado: 0000-0001-8520-8406; J.C. Tamarit-Urias: 0000-0003-3597-4510; Enrique Buendía-Rodríguez: 0000-0002-4264-6948; Gabriela Orozco-Gutiérrez: 000-0003-2836-9064

$\pm 10.13 \text{ Mg ha}^{-1}$ , de la cual  $139.09 \pm 6.81 \text{ Mg ha}^{-1}$  corresponden al carbono almacenado; en el área de estudio se estimaron  $19,714.91 \pm 61.87 \text{ t}$  de biomasa base seca y  $8,901.63 \pm 435.78$  de carbono almacenado. El carbono fijado fue de  $46 \pm 0.4\%$ ,  $44 \pm 0.4\%$ ,  $42 \pm 0.2\%$ ,  $42 \pm 0.5\%$  y  $38 \pm 1.0\%$  para culmos, ramas, follaje, raíz y hojarasca, respectivamente; siendo diferente el carbono en culmo y ramas con el contenido encontrado en follaje, raíz y hojarasca.

**Implicaciones.** Si bien, el aporte de ramas, follaje y hojarasca fue bajo, estos son los componentes estructurales más dinámicos y representan la maquinaria fotosintética para la producción de biomasa. **Conclusión.** Los bosques naturales de *G. aculeata* Rupr. tienen un alto contenido de carbono, similar al de especies arbóreas, por lo que se aconseja su conservación y el establecimiento de plantaciones forestales que permitan una captura de carbono sostenida en el tiempo.

**Palabras clave:** Almacenes de carbono; bambú guadua; cuantificación por componente estructural; carbono aéreo y subterráneo.

## INTRODUCCIÓN

Ante el problema del cambio climático inducido por el calentamiento global del planeta, la Organización de las Naciones Unidas en el marco del Acuerdo de París y del Protocolo de Kyoto, estableció a REDD+ como el mecanismo de política internacional para contribuir a mitigarlo (Devkota y Mustalahti, 2018), del cual México es un país miembro y tiene preestablecidos compromisos, sin embargo, para la República Mexicana se desconocen las aportaciones de biomasa y carbono que tienen los diferentes taxones de bambúes nativos. Para que la inclusión del bambú sea aprobada en esta política ambiental y pueda participar en el mecanismo de REDD+, es necesario que primero se justifique su inclusión como una especie apropiada para secuestrar carbono, lo cual solo es posible mediante investigaciones que permitan cuantificar el contenido de biomasa y el potencial de captura de carbono por taxón de bambú. Como premisa fundamental, con base en la FAO (2012) y en concordancia con Chazdon *et al.* (2016), se confirma y ratifica que el tipo de vegetación de diferentes taxones de bambú, sobre todo los catalogados como gigantes, es propiamente un bosque porque se apega con suficiencia a la definición que este organismo internacional estipula y de la cual se resaltan los criterios que tal vegetación cumple con propiedad: tierras con extensión mayor a 0.5 hectáreas, con árboles (en este caso ejemplares en forma de culmos) cuya altura es superior a 5 metros, con cobertura del dosel superior al 10% y sin que tal tierra se someta a uso predominante agrícola o urbano.

En el contexto referido, para diferentes regiones del planeta sin incluir a México, se reporta que bosques naturales y plantaciones con especies de bambú catalogadas como gigantes son capaces de producir una cantidad de carbono similar a la que producen plantaciones tropicales de latifoliadas, la cual llega a ser hasta de  $429 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Se ha determinado que la producción máxima de biomasa aérea total de plantaciones con especies de bambú en la India puede llegar a ser de hasta  $307 \text{ Mg ha}^{-1}$  (Darabant *et al.*, 2014), en tanto que, para taxones asiáticos el carbono aéreo puede ser de hasta  $128 \text{ Mg ha}^{-1}$  con un máximo

de carbono total del sistema bambú (aéreo y subterráneo) de hasta  $392 \text{ Mg ha}^{-1}$  (Yuen *et al.*, 2017), mientras que, para taxones de bambúes en bosques naturales del continente americano las estimaciones de biomasa podrían ser menores (Ziccardi *et al.*, 2019). Las diferencias podrían deberse en parte al tipo de bosque con bambú (natural o plantación) debido a diferentes arreglos topológicos, espaciamiento y densidad, también a la estructura vegetal dada por la naturaleza de crecimiento y fisiología específica de cada taxón.

Los bambúes son un grupo de especies pocas estudiadas en México, pero ampliamente distribuidas en el mundo (Clark *et al.*, 2015; Vorontsova *et al.*, 2016). Se han registrado más de 1600 especies de bambú en el planeta (Setiawati *et al.*, 2017); mientras que, en México Ruiz *et al.* (2021 a, b, c) reportan 56 especies de bambú leñoso, de las cuales 39 son endémicos del país, con amplia distribución geográfica y en diferentes condiciones climáticas (Ramírez-Ojeda *et al.*, 2021). El género *Guadua* es el más importante de América, nativo de este continente y conformado por aproximadamente 30 especies. Este género es el más utilizado a nivel comercial principalmente en la construcción debido a su dureza y disposición de sus fibras es considerado el bambú estructural por excelencia, además son los más grandes y frondosos del continente (Carrillo y Ochoa, 2010). El bambú tiene potencial para remediar problemas de erosión del suelo, control y conservación de agua, rehabilitación de tierras y secuestro de carbono (Ben-Zhi *et al.*, 2005), además, es frecuente su uso en la estabilización de taludes, protección de riberas de ríos y como sombra en ecosistemas agroforestales (Ceccon y Gómez, 2019).

Muchas especies de bambú son reconocidas por su potencial para capturar carbono (Yuen *et al.*, 2017), su rápido crecimiento y la producción continua de brotes propicia una alta dinámica en los diferentes almacenes de carbono (Liu *et al.*, 2018). El género *Guadua*, considerado como bambú gigante, alcanza dimensiones superiores a 20 metros en altura y diámetros normales mayor a 10 centímetros (Clark y Ely, 2011), asimismo, es frecuente que se desarrolle de

manera natural en los márgenes de ríos y arroyos como plantas aisladas o en pequeños rodales. *Guadua aculeata* Rupr. (carrizo, caña brava) es la especie más robusta de México; en rodales naturales ubicados en el municipio de Hueytamalco, Puebla se han registrado ejemplares de hasta 30 metros de altura y diámetros de 18 cm, sin embargo, se ha observado que estos rodales son escasos.

Con base en lo anterior, se planteó como objetivo el estimar la producción de biomasa y determinar el potencial de almacenamiento de carbono por unidad de superficie de rodales naturales del bambú nativo *G. aculeata* Rupr. en tres condiciones de vegetación y realizar el inventario de ambos parámetros en un predio localizado en la unidad de manejo forestal 2103 Teziutlán de Puebla, México.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El estudio se realizó en el predio “Las Margaritas”, ubicado al noroeste del estado de Puebla, México, en los municipios de Hueytamalco y San José Acateno, entre las coordenadas extremas 20° 02' 35" y 19° 58' 50" latitud Norte y 95° 21' 27" y 97° 16' 40" longitud Oeste a una altitud de entre 450 y 500 m, pertenece a la unidad de manejo forestal con número de identificación 2103 Teziutlán, Puebla, México. Ocupa una extensión de 2,523 ha, la cual es una de las superficies forestales más extensas, compactas y conservadas de la región, conformada por selva mediana perennifolia en diferentes etapas de crecimiento; entre las especies predominantes se encuentran: *Brosimum alicastrum*, *Croton draco*, *Matudea trinervi*, *Cymbopetalum bailonii*, *Guatteria amplifolia*, *Alchornea latifolia*, *Dussia mexicana*, en menor proporción *Cedrela odorata* y algunos *Quercus*. En las riberas de los ríos y humedales crece el bambú nativo *G. aculeata* formando pequeños rodales y que en su conjunto cubren una superficie estimada de 64 ha. El clima es *Afc* que se clasifica como subtropical húmedo semicálido con lluvias todo el año, con una precipitación promedio anual de 3,153 mm y una temperatura media anual de 21 °C, aunque se han registrado temperaturas máximas de 35 °C en la temporada seca y mínimas de 8 °C en invierno (García, 2004).

### Trabajo de campo

Con base en una clasificación de los tipos de vegetación y posterior rodalización, se ubicaron los rodales de *G. aculeata* con el apoyo de una imagen de satélite (image © 2019 Maxar technologies) del servidor en línea *Google® earth®*; la rodalización se verificó mediante recorridos de campo. De acuerdo

con García-Soria y Del Castillo-Torres (2015) y Fonseca-González y Rojas (2016) se levantaron 12 sitios de muestreo de 10 x 10 m, cubriendo una superficie de 100 m<sup>2</sup>, mismos que se distribuyeron exclusivamente en rodales naturales con esta especie, presentes en tres condiciones de vegetación: (1) selva mediana perennifolia, (2) acahuales y (3) potreros. Se registraron la ubicación geográfica (*GPS Magellan explorer 100®*), pendiente, exposición, altitud, condición de vegetación y distancia a corrientes de agua de cada sitio. Asimismo, se midió el diámetro normal (*Dn*) a 1.3 m de altura con una cinta diamétrica *Forestry Supplier* de todos los culmos presentes en los sitios. También, se registró el peso de la hojarasca depositada en un metro cuadrado.

Para la determinación del contenido de carbono por componente estructural, se tomaron 98 muestras de biomasa de aproximadamente 1000 g, de los cuales, 25 fueron de la base, parte media y punta del culmo; 13 de ramas de entre 0.5-2.0 cm de diámetro, para follaje se colectaron 25 muestras distribuidas equitativamente en la parte baja, media y alta de la copa; para la parte subterránea se tomaron 18 muestras de rizoma y raíces finas; en el caso de la necromasa se tomaron 12 muestras de hojarasca. Se registró el peso fresco de cada muestra en campo, las cuales fueron debidamente etiquetadas y posteriormente transportadas al laboratorio de productos forestales y tecnología de la madera del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, ubicado en Tlahuapan, Puebla, México.

### Estimación de la biomasa

La biomasa aérea base seca por componente estructural (culmo, ramas y follaje) y total de cada ejemplar de bambú se determinó mediante un sistema de ecuaciones aditivas generado previamente por Ordóñez-Prado *et al.* (2021) al aplicar un método destructivo, en su derivación se utilizó información de *Dn* en cm y de biomasa seca por componente y total en kg de una muestra de 41 ejemplares maduros de *G. aculeata* Rupr., cuyos datos se ajustaron por regresión para evaluar diferentes modelos alométricos. En ese análisis se determinó que el modelo de tipo potencial de la forma  $Y=aX^b$ , del cual se conformó el sistema, donde *Y* es la biomasa aérea por componente y total, *X* la variable predictora, *a* y *b* son parámetros estimados, proporcionó la más alta calidad predictiva porque presentó los mejores valores en los estadísticos de bondad de ajuste: coeficiente de determinación ajustado ( $R_{adj}^2$ ) y la raíz del cuadrado medio del error (RCME) (Yen y Lee, 2011; Ly *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2016), además de alta significancia en todos los parámetros del sistema (Di Rienzo *et al.*, 2005) al nivel

del 5%. La técnica de ajuste usada fue regresión aparentemente no relacionada (SUR por sus siglas en inglés), la cual minimiza los cuadrados de los residuos porque toma en cuenta la correlación de los errores de las ecuaciones y asegura la aditividad completa en las predicciones entre los modelos del sistema (Bi *et al.*, 2004; Huy *et al.*, 2019). Además, se corrigió la heterocedasticidad mediante un factor de ponderación definido por el inverso del  $Dn$  que se relacionó con la varianza del error, tal corrección se comprobó con la prueba de White (Álvarez-González *et al.*, 2007). El sistema de ecuaciones aditivas final de biomasa aérea presentó la estructura que se muestra en las ecuaciones 1-4.

$$Y_c = \exp(-2.44613) Dn^{2.446172} \quad 1$$

( $R_{adj}^2 = 0.93$ , RCME = 4.2849)

$$Y_r = \exp(-5.4065) Dn^{2.494163} \quad 2$$

( $R_{adj}^2 = 0.63$ , RCME = 0.7115)

$$Y_f = \exp(-8.82811) Dn^{3.7639121} \quad 3$$

( $R_{adj}^2 = 0.42$ , RCME = 0.9904)

$$Y_T = Y_c + Y_r + Y_f \quad 4$$

Donde  $Y_c$ ,  $Y_r$ ,  $Y_f$  y  $Y_T$  corresponden a la biomasa estimada del culmo, ramas, follaje y biomasa aérea total, respectivamente.

La cuantificación de la biomasa subterránea que corresponde a las raíces y rizoma por ejemplar se estimó al usar el factor de conversión de 0.16, el cual de acuerdo con Fonseca-González y Rojas (2016) corresponde a la proporción con respecto a la biomasa aérea total, el valor de este factor se considera robusto, estable y confiable porque fue determinado para *G. aculeata* Rupr. y *G. angustifolia* Kunth, cuyo sistema radicular y tipo de rizoma son de un hábito de crecimiento similar, con independencia del tipo de bosque (natural o plantación). Por su parte, la biomasa de la necromasa que, en este caso, propiamente correspondió a la hojarasca sobre el suelo, se estimó al relacionar el peso fresco de la hojarasca que se registró en campo con el respectivo peso seco que se obtuvo en laboratorio, posteriormente, se extrapoló a la superficie del sitio de muestreo. Con la suma de las estimaciones de la biomasa aérea y subterránea se obtuvo la biomasa total por ejemplar, con lo que al conocer el número de ejemplares en cada sitio fue posible obtener la biomasa en cada sitio de muestreo, a la cual se le adicionó la biomasa de la necromasa. De esta manera, finalmente la biomasa total estimada por sitio se escaló a nivel de hectárea y se expresó en ( $Mg\ ha^{-1}$ ).

## Determinación del almacenamiento de carbono

Para la estimación del carbono almacenado se determinó el carbono fijado en la biomasa en culmo, ramas, follaje, raíz y hojarasca. Para ello, las muestras de biomasa fueron secadas a una temperatura constante de 70 °C hasta su condición anhidra y después fueron fraccionadas en un molino modelo *Thomas Wiley*<sup>®</sup>, el material obtenido se pasó por un tamiz tamaño 40. Las muestras fueron etiquetadas y enviadas a laboratorio especializado para la determinación del contenido de carbono mediante un analizador de Carbono Orgánico Total modelo *Elementar*. Posteriormente, la biomasa estimada para cada componente estructural de cada bambú fue multiplicada por la proporción del contenido de carbono determinado, con ello se obtuvo el carbono almacenado por hectárea.

## Análisis estadístico

Para las variables  $Dn$ , contenido de biomasa y carbono almacenado por ejemplar se realizó un análisis de varianza y prueba de comparación múltiple de medias de Tukey al 95% de probabilidad, con lo que se evaluó el efecto de la condición de vegetación. Este mismo análisis también se realizó para el número de culmos, biomasa y carbono por unidad de superficie. Los bambúes inventariados fueron clasificados en una tabla de frecuencia por categoría diamétrica con intervalos de dos cm.

Para la concentración carbono por componente estructural, se verificaron los supuestos estadísticos de normalidad, independencia y varianza con tendencia cero de los datos observados mediante la prueba de *Kolmogorov-Smirnov* con la corrección de *Lilliefors* y de *Levene* de las librerías *nortest* y *car* del programa R<sup>®</sup> versión 3.6 (R Development Core Team, 2019). Posteriormente, se realizó el análisis de varianza del contenido de carbono y comparación múltiple de medias de Tukey al 95% de probabilidad (Zar, 2010). Se generó un inventario de biomasa y carbono de los bambusales del área de estudio a través de un muestreo simple aleatorio. Se estimó el promedio de biomasa por hectáreas, la desviación estándar e intervalos de confianza al 95% de confiabilidad, así como el error de muestreo. El inventario de biomasa se realizó para una superficie de 64 ha del taxón de bambú estudiado. Para el inventario de carbono, se multiplicó la biomasa de cada componente estructural del bambú por la respectiva proporción del carbono fijado expresado en  $Mg\ ha^{-1}$ . Finalmente, se generaron mapas indicativos de la distribución geográfica de la biomasa y carbono almacenado de los rodales de *G. aculeata* Rupr. en el

área de estudio. Los rodales fueron clasificados en las categorías de 0-200, 200-500, 500-1000, 1000-1500 y 1500-2000 Mg de biomasa y de 0-100, 100-250, 250-500, 500-750 y 750-1000 Mg de carbono resguardado.

## RESULTADOS

### Cantidad de culmos por condición de vegetación

Los rodales de *G. aculeata* Rupr. estudiados presentaron en promedio una densidad de  $7,683 \pm 50$  culmos por hectárea, los rodales ubicados en condiciones de acahual presentaron la menor densidad (31.7% menos con respecto a la densidad promedio), en tanto que, los rodales ubicados en las condiciones de selva mediana perennifolia y potreros presentaron las mayores densidades (8.0 y 23.6% más con respecto al promedio, respectivamente) (Tabla 1). Al relacionar los valores de densidad con las dimensiones en diámetro normal, se observó que los culmos más delgados se presentaron en rodales ubicados en potreros, lo que sugiere que tal relación podría mantener un comportamiento inversamente proporcional, lo anterior toda vez que en las otras

condiciones de vegetación se registraron mayores dimensiones en diámetros, lo cual tendrá un efecto sensible sobre la cantidad de biomasa estimada y el contenido de carbono capturado.

El análisis del efecto de la distancia a las escorrentías en la densidad de los rodales sugiere que *G. aculeata* Rupr. se desarrolla mejor en zonas húmedas porque el número de culmos fue mayor en SMP y potreros que se localizan a una distancia máxima de 60 m. Por su parte, la altitud, exposición y pendiente parecen no tener un efecto visible sobre la densidad porque no se observó un patrón definido y por tanto no hay evidencia de que influyan en las estimaciones de contenido de biomasa y de carbono (Tabla 1).

El análisis de frecuencias de la distribución de diámetros (Tabla 2) evidenció que de los 922 ejemplares muestreados de *G. aculeata* Rupr., el 57% se concentra en dos categorías diamétricas (de 8.5 a 12.49 cm), las cuales se localizan en el centro de la distribución, situación que evidencia una distribución normal, misma que desde el punto de vista de la dinámica de crecimiento de este taxón y de la sostenibilidad

**Tabla 1. Estadísticas descriptivas básicas de *G. aculeata* Rupr. por condición de vegetación.**

Variables	Condición de vegetación		
	SMP	Acahual	Potreros
Culmos promedio por hectárea	8,300	5,250	9,500
<i>Dn</i> promedio (cm)	11.5	11.3	9.5
<i>Dn</i> máximo (cm)	15.3	16.5	15.5
<i>Dn</i> mínimo (cm)	5	2.5	3.5
Rango de distancia a escorrentías (m)	15 - 60	250 - 350	0 - 40
Rango de altitud (m)	400 - 500	500 - 600	480 - 580
Exposición	Sur (2), Noreste y Noroeste	Norte (2), Suroeste y Zenital	Norte, Noreste, Sureste y Suroeste
Rango de pendiente	5 - 10	5 - 10	0 - 17

SMP=selva mediana perennifolia; *Dn*=diámetro normal.

**Tabla 2. Frecuencias de diámetro normal (*Dn*) de culmos de *G. aculeata* Rupr. inventariados en el predio Las Margaritas, Puebla, México.**

Rango de <i>Dn</i> (cm)	Frecuencia absoluta	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa	Frecuencia relativa acumulada
2.5 - 4.49	11	11	0.012	0.012
4.5 - 6.49	67	78	0.073	0.085
6.5 - 8.49	114	192	0.124	0.209
8.5 - 10.49	216	408	0.234	0.443
10.5 - 12.49	310	718	0.336	0.779
12.5 - 14.49	167	885	0.181	0.960
14.5 - 16.49	37	922	0.040	1

de la producción de biomasa es lógica y deseable porque se mantiene un equilibrio dinámico. Solo el 22% de los culmos son iguales o mayores a 12.5 cm y el porcentaje restante se ubica en clases de diámetro de 2.5 a 8.49 cm. El rango, varianza y coeficiente de variación de la distribución fueron de 14, 6.72 y 0.25, respectivamente.

### Estimación de biomasa

El análisis de la cantidad de biomasa aérea promedio por individuo en cada condición ecológica estimada con el sistema de ecuaciones aditivas condujo a determinar que la biomasa de los ejemplares presentes en rodales de SMP y acahuales fue mayor con respecto a la estimada en rodales de potreros (Figura 1a). El promedio fue de  $45.10 \pm 0.82$ ,  $46.07 \pm 1.61$  y  $31.52 \pm 1.07$  kg de biomasa por individuo ubicados en SMP, acahuales y potreros, respectivamente. La diferencia de biomasa entre los individuos de SMP y los del potrero fue del 43%, una diferencia similar se encontró entre ejemplares de acahual con respecto a los que se localizan en potrero. La prueba estadística evidenció que tales diferencias fueron significativas; mismas que pueden explicarse por el efecto de la densidad de culmos presentes en cada condición, en donde a mayor densidad corresponderá una menor biomasa por ejemplar, lo que significa que en la condición de potrero se tienen más individuos, pero más delgados.

Con relación al aporte de cada componente estructural a la biomasa total por individuo (biomasa aérea más subterránea); se determinó que la mayor cantidad de biomasa se encuentra en los culmos, los cuales aportan

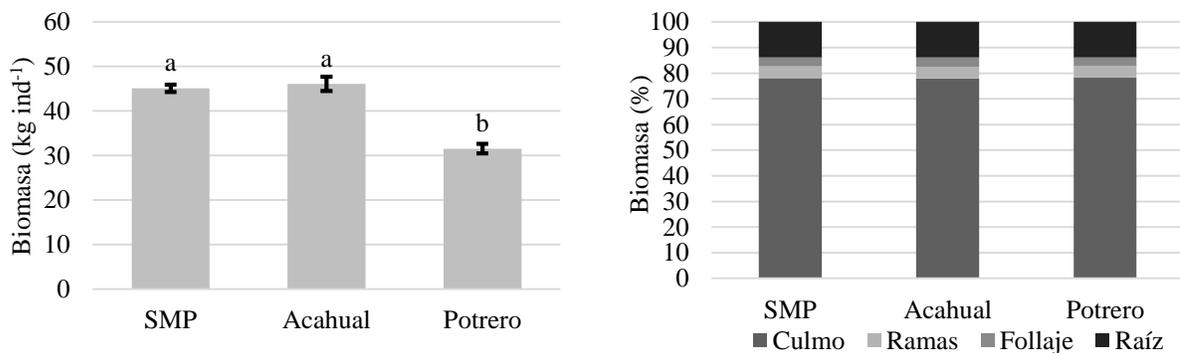
más del 70%; seguidos por raíces, la biomasa conjunta del follaje y ramas apenas sobrepasan el 10% (Figura 1b).

### Carbono almacenado

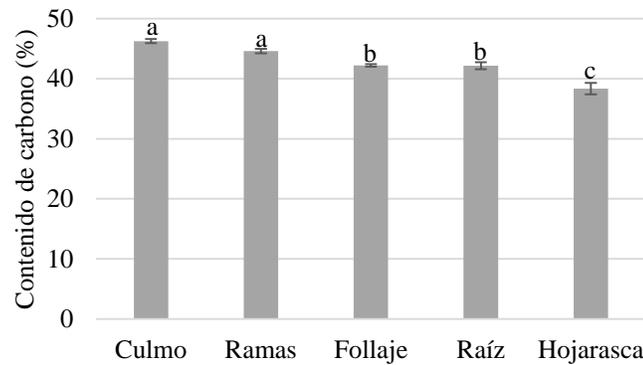
Los culmos presentaron el contenido de carbono más alto con un promedio de  $46 \pm 0.4\%$ , seguido por las ramas con  $44 \pm 0.4\%$ , mientras que las hojas y raíz presentan contenido de carbono similar del  $42 \pm 0.2\%$  y  $42 \pm 0.5\%$  respectivamente. La hojarasca presentó el valor más bajo con  $38 \pm 1.0\%$ . La comparación múltiple de medias de Tukey mostró que no hay diferencia estadística entre el contenido de carbono del culmo y ramas, pero si existe entre estos dos componentes con respecto a la biomasa de follaje y raíz, el promedio de carbono entre follaje y raíz fue similar, el contenido de carbono en la hojarasca se diferenció del resto de los componentes (Figura 2).

Este resultado evidencia que la concentración de carbono en el culmo y ramas de ejemplares de *G. aculeata* Rupr. son ligeramente menores al cuantificado para árboles perennes de hoja ancha y de coníferas, los cuales almacenan el  $49.64 \pm 4.42\%$  y  $48.25 \pm 2.56\%$  en fuste y ramas, respectivamente. Sin embargo, es superior al carbono que fijan las plantas herbáceas del  $42.56 \pm 4.57\%$  (Ma et al., 2018).

El carbono promedio almacenado por individuo fue de  $20.51 \pm 0.37$ ,  $20.95 \pm 0.73$  y  $14.34 \pm 0.48$  kg para bambúes de SMP, acahuales y potreros, respectivamente; se encontraron diferencias significativas entre la biomasa de los dos primeros



**Figura 1.** a) Cantidad de biomasa (kg ind<sup>-1</sup>) y b) Distribución de biomasa por componente estructural (%) en *G. aculeata* Rupr. en tres condiciones de vegetación. Valores promedio  $\pm$  error estándar, letras diferentes indican diferencia estadística significativa con  $p < 0.05$ .



**Figura 2.** Contenido de carbono (%) por componente estructural de *G. aculeata* Rupr. y comparación múltiple de medias de Tukey. Valores promedio  $\pm$  error estándar, letras diferentes indican diferencia estadística significativa con  $p < 0.05$ .

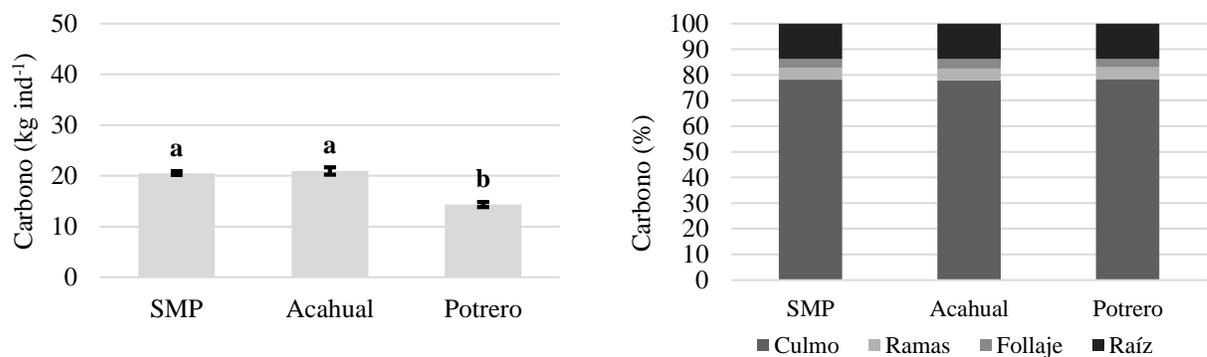
grupos con respecto a la biomasa del tercero (Figura 3a). Con respecto al aporte de cada componente estructural al carbono total por ejemplar de bambú, se determinó que la mayor cantidad se encuentra en los culmos, los cuales aportan más del 70%, seguido por raíces, mientras que el carbono conjunto del follaje y ramas no sobrepasan el 10% (Figura 3b).

### Inventario de biomasa y carbono

Con base en el inventario de biomasa total base seca a nivel de unidad de superficie (biomasa aérea más biomasa subterránea más biomasa de hojarasca), se determinó que en promedio fue de  $308.05 \pm 10.13$  Mg ha<sup>-1</sup>, resalta el hecho de que no se encontraron diferencias significativas entre la producción de biomasa total por condición de vegetación. La distribución porcentual de esta biomasa fue de 77, 5, 3,

14 y 1% para la biomasa de culmos, ramas, follaje, raíces y hojarasca, respectivamente.

Se identificaron 39 rodales de bambú *G. aculeata* Rupr. con una superficie promedio de 1.5 ha, mínima de 0.5 ha y máxima de 5.6 ha. El inventario estimado de biomasa y de carbono en una superficie 64 ha de bosques con este taxón fue de  $19,714.91 \pm 61.87$  Mg de biomasa (Figura 4), en tanto que el carbono almacenado fue de  $8,901.6 \pm 435.78$  Mg de carbono orgánico (Figura 5). Los rodales tienden a distribuirse en los márgenes de corrientes de agua, por lo que se infiere que esta especie de bambú, adicional a la captura de carbono, también cumple una función y da un servicio de tipo hidrológico y de protección contra la erosión del suelo. El tamaño de los rodales puede estar explicado por el manejo histórico del predio como área de pastoreo y por tanto la extensión de estos se mantenía controlada.



**Figura 3.** a) Cantidad de carbono (kg ind<sup>-1</sup>) y b) Distribución de carbono por componente estructural (%) en *G. aculeata* Rupr. en tres condiciones de vegetación. Valores promedio  $\pm$  error estándar, letras diferentes indican diferencia estadística significativa con  $p < 0.05$ .

Estos bosques almacenan en promedio  $139.09 \pm 6.81$  Mg ha<sup>-1</sup> de carbono, el aporte porcentual por componente estructural fue del 79, 4, 3, 13 y 1% para culmos, ramas, follaje, raíces y hojarasca, respectivamente (Tabla 3).

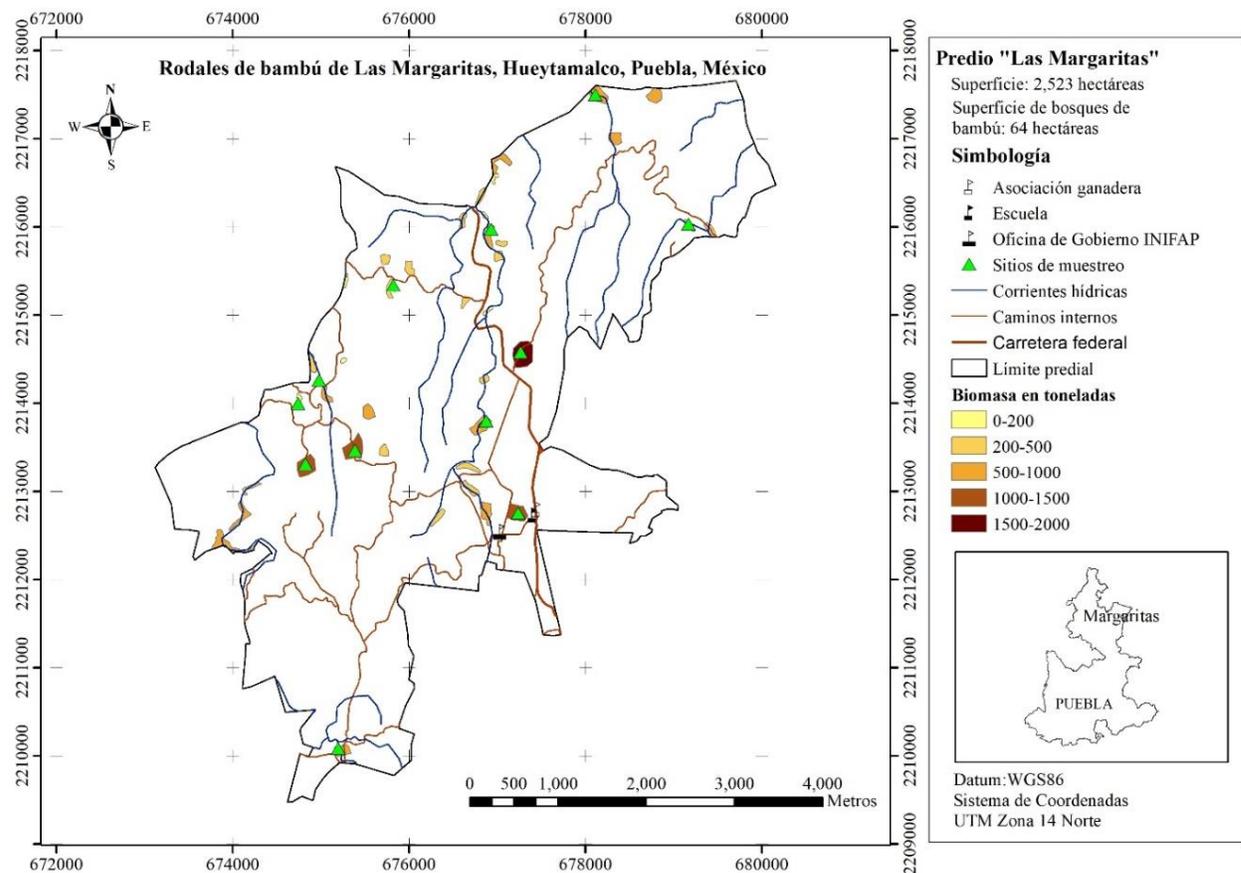
### DICUSIÓN

La cantidad de culmos por unidad de superficie estimado y la forma de la distribución diamétrica sugiere que los rodales de bambú analizados son

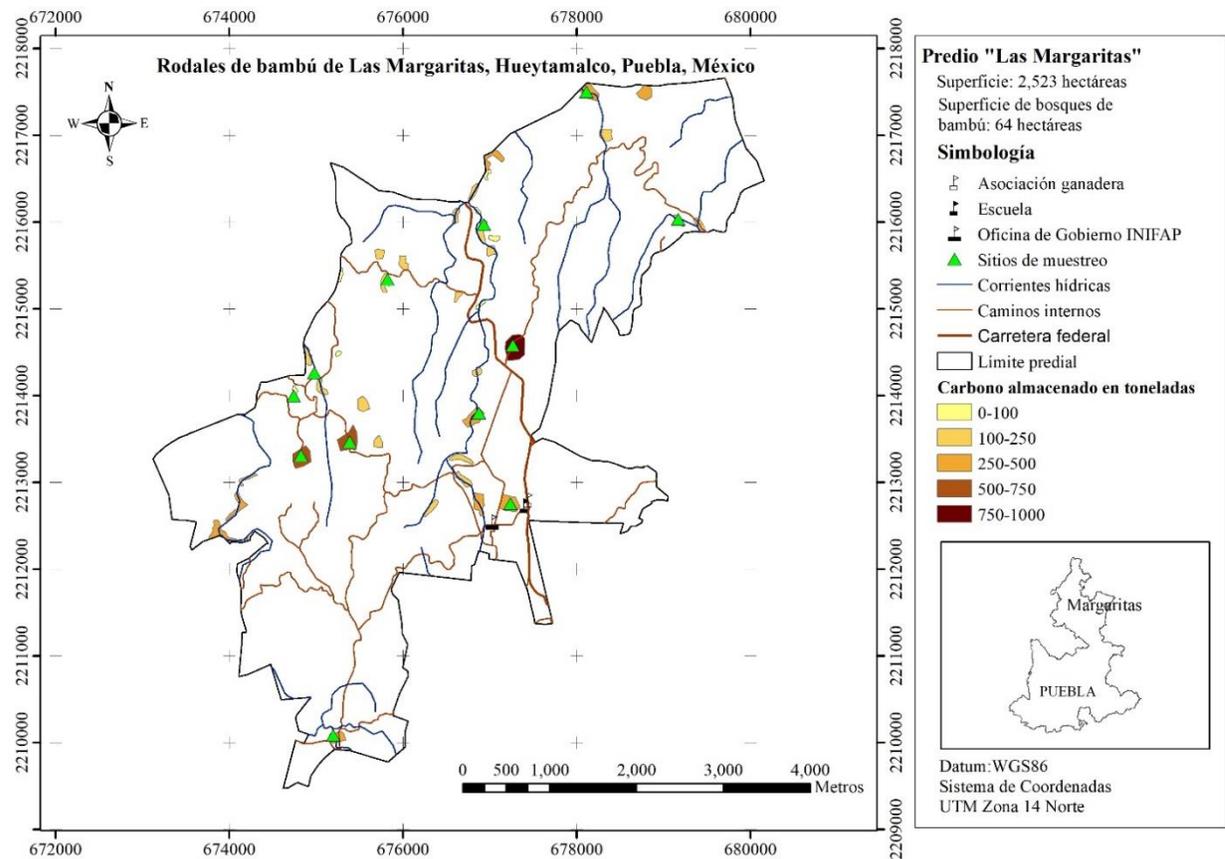
maduros y productivos, aunque no han llegado a su máximo desarrollo y crecimiento, esto se deduce porque el promedio del *Dn* estimado aún es menor al *Dn* medio de 17 cm observado en rodales que han sido aprovechados comercialmente. Con respecto a los bambús ubicados en la condición de potreros, el diámetro promedio menor (9.5 cm) indica que aún se encuentran en crecimiento, pero que difícilmente alcanzarán las dimensiones de las otras condiciones de crecimiento debido a que la calidad de sitio es comparativamente menor.

**Tabla 3. Biomasa y carbono almacenado en bambusales de *Guadua aculeata* Rupr. del predio “Las Margaritas”, Puebla, México.**

Componente	Biomasa base seca (Mg ha <sup>-1</sup> )	Inventario de biomasa total en el predio (Mg)	Contenido de carbono (Mg ha <sup>-1</sup> )	Inventario de carbono total en el predio (Mg)
Culmo	238.57±8.92	15,268.41±570.72	109.74±6.05	7,023.47±387.08
Ramas	13.91±2.15	890.15±137.80	6.12±1.43	391.66±91.41
Follaje	10.66±1.89	682.38±120.65	4.48±1.22	286.60±78.19
Raíces	42.10±3.75	2,694.55±239.76	17.68 ± 2.43	1,131.71±155.38
Hojarasca	2.80±0.97	179.42±61.87	17.68 ± 0.60	68.18±38.14
Total	308.05±10.13	19,714.91±61.87	139.09±6.81	8,901.63±435.78



**Figura 4.** Distribución de biomasa en rodales de bambú *G. aculeata* Rupr. en el predio ‘Las Margaritas’ Hueytamalco, Puebla.



**Figura 5.** Distribución del carbono almacenado en rodales de bambú *G. aculeata* Rupr. en la zona de estudio.

El número de culmos promedio de 7,683 por hectárea aquí determinado es mayor al reportados por Aguirre *et al.* (2018) quienes observaron densidades de 3,300 culmos por hectárea en plantaciones comerciales de *G. angustifolia* Kunth de cuatro años establecidas en la misma región de estudio, lo cual se puede deber a que tales plantaciones aún son jóvenes y no han alcanzado su máxima producción. Mientras que, para plantaciones de *B. oldhamii* Munro establecidas en Veracruz, México, Castañeda *et al.* (2005) reportan 10,101 culmos por hectárea. También, los resultados son similares a la estructura de plantaciones comerciales de bambú de entre cinco y siete años de *G. angustifolia* Kunth de Colombia, que presentan entre 5,090 y 9,416 culmos por hectárea (Carmargo *et al.*, 2010). Por otra parte, Fonseca-González y Rojas (2016) registraron densidades de población de 10,793 y 6,473 culmos por hectárea para plantaciones de *D. latiflorus*, y plantaciones combinadas de *G. angustifolia* Kunth y *G. aculeata* Rupr. establecidas en Costa Rica.

En estudios realizados en el continente asiático, Yen y Lee (2011) reportan para bambusales de *Phyllostachys heterocyclus* ((Carrière) J.Houz) de China, densidades

de  $7,078 \pm 418$  culmos por hectárea con diámetros de  $8.75 \pm 0.86$  cm, valores similares a los registrados en el presente estudio. Mientras que, Xu *et al.* (2018) reportan 3,251.26 culmos por hectárea en rodales de *Phyllostachys pubescens* de 10 años, lo que es menor a la aquí estimada, esta diferencia puede atribuirse al tipo de crecimiento del rizoma leptomorfo, por lo que los culmos crecen totalmente separados y su distanciamiento no es predecible. También estas diferencias pueden deberse a la morfología y forma de crecimiento de las especies; *D. latiflorus* y *B. oldhamii* Munro presentan crecimiento paquimorfo cerrado, por lo que los culmos emergen muy cerca uno de otros, lo que permite tener mayor número de individuos por unidad de superficie, mientras el género *Guadua* presenta crecimiento paquiformo abierto, donde los hijuelos emergen con una separación ligeramente mayor. Otro elemento de estas disparidades es debido al origen de los estudios, ya que la mayoría se realizan en plantaciones comerciales que aún no han llegado a su madurez, la densidad de estas cambia con el tiempo, incorporándose nuevos individuos cada año, hasta llegar a un equilibrio donde el número de individuos que nacen es similar a los tallos sobre maduros que mueren (Riaño *et al.*, 2002).

**Tabla 4. Comparativo de la distribución porcentual de biomasa aérea por componente estructural.**

Especie	Región geográfica	Componente			Referencia
		Culmo	Ramas	Follaje	
<i>G. aculeata</i>	Puebla, México	90.5	5.5	4.0	Presente estudio
<i>G. angustifolia</i> y <i>G. aculeata</i>	Guanacaste y Alajuela, Costa Rica	83.9	8.2	7.8	Fonseca-González y Rojas (2016)
<i>B. oldhamii</i>	Veracruz, México	76.0	8.1	15.9	Castañeda <i>et al.</i> (2005)
<i>P. heterocycla</i>	Zona centro, Taiwán	82.5	12.8	4.7	Yen y Lee (2011)
<i>Pys. praecox</i>	Lin'an, China	78.8	5.3	15.9	Nath <i>et al.</i> (2009)
<i>B. cacharensis</i>	India	83.4	11.9	4.7	Nath <i>et al.</i> (2011)

La biomasa de los rodales de bambú distribuidos en la selva mediana perennifolia y acahuals no presentaron diferencias significativas, lo que indica que las características fisiográficas como distancia a escorrentías, altitud, exposición y pendiente no representan una limitante en el crecimiento del *G. aculeata* Rupr. En cuanto a las observaciones tomadas en rodales ubicados en potrero, demuestran que son rodales jóvenes con diámetros pequeños, pero con mayor número de culmos por hectárea. La biomasa estimada del presente estudio es superior a la reportada por López-Martell (2008), quien reporta 25.4 kg para bambúes de la especie *Bambusa vulgaris* Schrader ex Wendland en la provincia de Granma, Cuba. En cuanto a la distribución porcentual de biomasa aérea por componente estructural, los resultados obtenidos son similares a los reportados para otras especies de regiones geográficas diferentes (Tabla 4).

La estimación de biomasa a nivel hectárea son superiores a los reportados para plantaciones comerciales de *B. oldhamii* Munro y *G. angustifolia* Kunth, establecidas en la misma región de estudio (Aguirre *et al.*, 2018), lo que evidencia que los rodales de *G. aculeata* Rupr. se encuentran en zonas con características fisiográficas idóneas para su desarrollo. También, los resultados son superiores a la reportados

por López-Martell *et al.* (2018), quienes reportan un promedio de 70.9 Mg ha<sup>-1</sup> en *B. vulgaris* Schrader ex Wendland en la provincia de Granma, Cuba.

Las estimaciones del contenido de carbono conducen a reafirmar el alto potencial que tienen los bosques de bambú para capturar y almacenar carbono, aunque la fijación de carbono es ligeramente menor que en las especies arbóreas, su rápido crecimiento y producción constante es una fortaleza que poseen estos ecosistemas para capturar de carbono (Zhou *et al.*, 2005). Los resultados obtenidos son menores a los reportados para el bambú gigante *Dendrocalamus strictus* L. del valle de Doon en la India, el cual presenta porcentajes de 48.66, 48.09 y 44.68 para culmo, ramas y follaje, respectivamente (Kaushal *et al.*, 2016). También son diferentes a los reportados por Fonseca-González y Rojas (2016) quienes reportan para *G. aculeata* Rupr. y *G. angustifolia* Kunth provenientes de plantaciones en Costa Rica, concentraciones de carbono de 43.3% a 47.2% para culmo y ramas, mientras que para follaje el contenido fue de 36.4%, el cual es menor al encontrado en el presente estudio; en cuanto a la hojarasca (necromasa) su estudio reporta 46.7%. Otros estudios se limitan a utilizar la constante de 0.5 (Xu *et al.*, 2018), lo que crea incertidumbre al realizar tales determinaciones.

**Tabla 5. Comparativo del almacenamiento de carbono en ecosistemas forestales de México.**

Tipo de bosque	Región geográfica	Carbono almacenado (Mg ha <sup>-1</sup> )	Referencia
Bosques de bambú <i>G. aculeata</i>	Puebla, México	139.09	Presente estudio
Bosque montano de niebla	Oaxaca, México	167.1	Álvarez <i>et al.</i> (2013)
Bosques de <i>Abies religiosa</i>	Estado de México, México	221.84	Bolaños <i>et al.</i> (2017)
Bosques tropicales subcaducifolios	Tamaulipas, México	94.6	Rodríguez <i>et al.</i> (2007)
Bosques de pino-encino	Chiapas, México	158.00	Rodríguez <i>et al.</i> (2016)
Matorral xerófilo	Guanajuato, México	11.00	Becerril <i>et al.</i> (2014)
Manglares	Golfo de México	137.32	Herrera <i>et al.</i> (2016)

El carbono almacenado es menor a los reportados por Fonseca-González y Rojas (2016), quienes para plantaciones de *D. latiflorus* estimaron 186.73 Mg ha<sup>-1</sup>, mientras que para plantaciones de *G. angustifolia* Kunth y *G. aculeata* Rupr. reportan 117.74 Mg ha<sup>-1</sup>, valor menor al determinado en el presente estudio. Esta estimación es similar a la consignada por García-Soria y Del Castillo (2015), quienes para bosques naturales de bambú *G. sarcocarpa* Londoño & Peterson en Perú, registraron un almacenamiento de carbono de 121.86 Mg ha<sup>-1</sup>. Los resultados obtenidos en el presente estudio muestran que los bosques de bambú de *G. aculeata* Rupr. tienen alto potencial para almacenar carbono igual o más que otros ecosistemas forestales en México (Tabla 5). Estos contrastes conducen a que este taxón pueda ser considerado en México, como una especie de bambú idónea para proyectos orientados a capturar y almacenar carbono que puede contribuir a mitigar el problema de cambio climático.

## CONCLUSIÓN

El inventario de los bosques de bambú con *G. aculeata* Rupr. permitió cuantificar la biomasa y el carbono almacenado en este tipo de ecosistema. El almacenamiento de carbono estimado en 139.09 Mg ha<sup>-1</sup> indica que el potencial de captura es alto y puede estar a la par de bosques templados, por lo que representan una alternativa que puede contribuir a mitigar los efectos del cambio climático, restaurar áreas degradadas y proteger riberas de ríos. La biomasa promedio por individuo fue mayor en los bambúes presentes en la selva mediana perennifolia y en acahuals.

El componente estructural culmo aportó más del 70% de la biomasa y carbono almacenado. Si bien, el aporte de ramas, follaje y hojarasca fue bajo, estos son los componentes estructurales más dinámicos y representan la maquinaria fotosintética para la producción de biomasa.

En ulteriores estudios de biomasa y carbono con esta especie, es recomendable que se incluya el factor tiempo, lo que permitirá determinar la tasa de crecimiento y con ello la dinámica de biomasa y carbono, aspecto que contribuirá a reforzar el potencial de este taxón y sea más firme la posibilidad de que sea considerado en el mecanismo de REDD+.

Debido a la alta fragmentación observada en los bosques de *G. aculeata*, donde el dosel más extenso no superó las seis hectáreas, es importante realizar prácticas de manejo sustentable y conservación. Así

como aumentar su superficie a través de plantaciones comerciales o restauración de áreas degradadas en la región de estudio.

## Acknowledgments

The authors thank Volkswagen de México S. A. de C. V. for financing the research carried out and Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias for the resources provided for this study.

**Funding.** It is declared that the costs of this research were mainly financed by the company Volkswagen de México S. A. de C. V., through the project: Establishment of a sustainable forest plantation of native bamboo (*Guadua aculeata* Rupr.) in an area of 355 hectares in the Experimental Site "Las Margaritas" Municipality of Hueytamalco, Puebla.

**Conflict of interest.** The authors declare that they have no conflict of interest in carrying out the research work from which they derived the data used.

**Compliance with ethical standards.** Does not apply.

**Data availability.** Data are available upon reasonable request with the corresponding author.

**Author contribution statement (CRediT).** **C. Ordóñez-Prado** - Conceptualization, funding acquisition, formal analysis and writing original draft., **J. C. Tamarit-Urias** - Conceptualization, supervision, formal analysis, writing- review & editing., **E. Buendía-Rodríguez** - Formal analysis, writing- review & editing., **G. Orozco-Gutiérrez** - Data curation, writing- review & editing.

## REFERENCIAS

- Aguirre-Cadena, J. F., Ramírez-Valverde, B., Cadena-Iníiguez, J., Juárez-Sánchez, J. P., Caso-Barrera, L. and Martínez-Carrera, D., 2018. Biomasa y carbono en *Guadua angustifolia* y *Bambusa oldhamii* en dos comunidades de la sierra Nororiental de Puebla, México. *Revista de Biología Tropical*, 66(4), pp.1701-1708. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/rbt/v66n4/0034-7744-rbt-66-04-1701.pdf>
- Álvarez-Arteaga, G., García-Calderón, N. E., Krasilnikov, P. and García-Oliva, F., 2013. Almacenes de carbono en bosques montanos de niebla de la sierra norte de Oaxaca, México. *Agrociencia*, 47, pp.171-180. <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v47n2/v47n2a6.pdf>
- Álvarez-González, J. G., Rodríguez-Soalleiro, R. and

- Rojo-Alboreca, A., 2007. Resolución de problemas del ajuste simultáneo de sistemas de ecuaciones: heterocedasticidad y variables dependientes con distinto número de observaciones. *Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 23, pp.35-42.
- Becerril-Piña, R., González-Sosa, E., Mastachi-Loza, C. A., Díaz-Delgado, C. and Ramos-Salinas, N. M., 2014. Contenido de carbono en un ecosistema semiárido del centro de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 1(1), pp.9-18. <http://www.scielo.org.mx/pdf/era/v1n1/v1n1a2.pdf>
- Ben-zhi, Z., Mao-yi, F., Jin-zhong, X., Ciao-sheng, Y. and Zheng, C., 2005. Ecological functions of bamboo forest: Research and Application. *Journal of Forestry Research*, 16, pp.143-147. <https://doi.org/10.1007/BF02857909>
- Bi, H., Turner, J. and Lambert, M., 2004. Additive biomass equations for native forest eucalypt trees of temperate Australia. *Trees*, 18(4), pp.467-479. <https://doi.org/10.1007/s00468-004-0333-z>
- Bolaños-González, Y., Bolaños-González, M. A., Paz-Pellat, F. and Ponce-Pulido, J. I., 2017. Estimación de carbono almacenado en bosques de oyamel y ciprés en Texcoco, Estado de México. *Terra Latinoamericana*, 35, pp.73-86. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v35n1/2395-8030-tl-35-01-00073.pdf>
- Camargo, J. C., Rodríguez, J. and Arango, A., 2010. Crecimiento y fijación de carbono en una plantación de *Guadua* en la zona cafetera de Colombia. *Recursos Naturales y Ambiente*, 61, pp.86-94. <http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/5987/13.Camargo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Carrillo-Avella, Á. and Ochoa-Gil, V. J., 2010. Estatus de la *Guadua* como material constructivo según concepto de los usuarios de los estratos 1 a 3 de la sociedad Quindiana. *Sophia*, 6(2), pp.1-10. <https://www.redalyc.org/pdf/4137/413740747009.pdf>
- Castañeda, A., Vargas, J., Gómez, A., Valdez, J. and Vaquera, H., 2005. Acumulación de carbono en la biomasa aérea en una plantación de *Bambusa oldhamii*. *Agrociencia*, 30(1), pp.107-113. <https://www.redalyc.org/pdf/302/30239110.pdf>
- Chazdon, R. L., Brancalion, P. H. S., Laestadius, L., Bennett-Curry, A., Buckingham, K., Kumar, C. and Wilson, S. J., 2016. When is a forest a forest? Forest concepts and definitions in the era of forest and landscape restoration. *Ambio*, 45(5), pp.538-550. <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0772-y>
- Ceccon, E. and Gómez-Ruiz, P. A., 2019. Las funciones ecológicas de los bambúes en la recuperación de servicios ambientales y en la restauración productiva de ecosistemas. *Revista de Biología Tropical*, 67(4), pp.679-691. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/rbt/v67n4/0034-7744-rbt-67-04-679.pdf>
- Clark, L. G., Londoño, X. and Ruiz-Sánchez, E., 2015. Bamboo Taxonomy and Habitat. In: W. Liese and M. Köhl eds. *Bamboo: The plant and tissues*. New York: Springer. pp.1-30. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-14133-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-14133-6_1)
- Clark, L. and Ely, F., 2011. Géneros de bambúes leñosos (*Poaceae: Bambusoideae: Arundinarieae, Bambuseae*) de Venezuela. *Acta Botánica Venezuelica*, 34(1), pp.79-103. <http://www.jstor.org/stable/44512561>
- Darabant, A., Haruthaithanasan, M., Atkila, W., Phudphong, T., Thanavat, E. and Haruthaithanasan, K., 2014. Bamboo biomass yield and feedstock characteristics of energy plantations in Thailand. *Energy Procedia*, 59, pp.134-141. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.359>
- Devkota, B. P. and Mustalahti, I., 2018. Complexities in accessing REDD+ benefits in community forestry: evidence from Nepal's Terai region. *International Forestry Review*, 20(3), pp.332-345. <https://doi.org/10.1505/146554818824063041>
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., González, L. A., Tablada, E. M., Díaz, M. P., Robledo, C. W. and Balzarini, M. G., 2005. *Estadística para las ciencias agropecuarias* (6ta ed.). Córdoba Argentina: Brujas.
- FAO, 2012. *FRA 2015 terms and definitions. Forest Resources Assessment Working Paper 180*. Rome: Food and Agricultural Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/ap862e/ap862e.pdf>
- Fonseca-González, W. and Rojas V. M., 2016. Acumulación y predicción de biomasa y carbono en plantaciones de bambú en Costa Rica. *Ambiente y Desarrollo*, 20(38), pp.85-98. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.ayd20-38.apbc>
- García, E., 2004. *Modificaciones al sistema de*

- clasificación climática de Köppen*. México: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. pp.275-277.  
<http://ve.scielo.org/pdf/zt/v26n3/art25.pdf>
- García-Soria, D. and Del Castillo-Torres, D., 2015. Estimación del almacenamiento de carbono y estructura en bosques con presencia de bambú (*Guadua sarcocarpa*) de la comunidad nativa Bufeño Pozo, Ucayali, Perú. *Folia Amazónica*, 22 (2), pp.105-103. <https://doi.org/10.24841/fa.v22i1-2.53>
- Herrera-Silveira, J. A., Camacho-Rico, A., Pech, E., Pech, M., Ramírez-Ramírez, J. and Teutli-Hernández, C., 2016. Dinámica del carbono (almacenes y flujos) en manglares de México. *Terra Latinoamericana*, 34, pp.61-72. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n1/2395-8030-tl-34-01-00061.pdf>
- Huy, B., Thanh, G. T., Poudel, K. P. and Temesgen, H., 2019. Individual plant allometric equations for estimating aboveground biomass and its components for a common bamboo species (*Bambusa procera* A. Chev. and A. Camus) in tropical forests. *Forests*, 10(4), pp.1-17. <https://doi.org/10.3390/f10040316>
- Kaushal, R., Subbulakshmi, V., Tomar, J. M. S., Alam, N. M., Jayaparkash, J., Mehta, H. and Chaturvedi, O. P., 2016. Predictive models for biomass and carbon stock estimation in male bamboo (*Dendrocalamus strictus* L.) in Doon valley, India. *Acta Ecologica Sinica*, 36(6), pp.469-476. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2016.07.003>
- Li, L. E., Lin, Y. J. and Yen, T. M., 2016. Using allometric models to predict the aboveground biomass of thorny bamboo (*Bambusa stenostachya*) and estimate its carbon storage. *Taiwan Journal of Forest Science*, 31(1), pp.37-47. [https://kmweb.coa.gov.tw/files/document/365299/216a9720d2184cc0f3bcf047f43c6567\\_v2.pdf](https://kmweb.coa.gov.tw/files/document/365299/216a9720d2184cc0f3bcf047f43c6567_v2.pdf)
- Liu, Y., Zhou, G., Du, H., Berninger, F., Mao, F., Li, X., Chen, L., Cui, L., Li, Y., Zhu, D. and Xu, L., 2018. Response of carbon uptake to abiotic and biotic drivers in an intensively managed Lei bamboo forest. *Journal of Environmental Management*, 223, pp.713-722. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.046>
- López-Martell, A., 2008. Rendimiento de biomasa de *Bambusa vulgaris* y su relación con la protección de los suelos en la provincia de Granma, Cuba. *Zootecnia Tropical*, 26(3), pp.275-277.  
<http://ve.scielo.org/pdf/zt/v26n3/art25.pdf>
- López-Martell, A., Fernández-Concepción, R. R. and González-Menéndez, M., 2018. Producción de biomasa aérea de *Bambusa vulgaris* Schrader ex Wendland en siete localidades de la provincia Granma. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 6(3), pp.300-310. <http://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/artic/view/384/>
- Ly, P., Pillot, D., Lamballe, P. and De Neergaard, A., 2012. Evaluation of bamboo as an alternative cropping strategy in the northern central upland of Vietnam: Above-ground carbon fixing capacity, accumulation of soil organic carbon, and socio-economic aspects. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 149, pp.80-90. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.12.013>
- Ma, S., He, F., Tian, D., Zou, D., Yan, Z., Yang, Y., Zhou, T., Huang, K., Shen, H. and Fang, J., 2018. Variations and determinants of carbon content in plants: a global synthesis. *Biogeosciences*, 15, pp.693-702. <https://doi.org/10.5194/bg-15-693-2018>
- Nath, A. J., Das, G. and Das, A. K., 2009. Above ground standing biomass and carbon storage in village bamboos in North East India. *Biomass Bioenergy*, 33(9), pp.1188-1196. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.05.020>
- Nath, A. J. and Das, A. K., 2011. Carbon storage and sequestration in bamboo-based smallholder homegardens of Barak Valley, Assam. *Current Science*, 100(2), pp.229-233. <https://www.jstor.org/stable/24073051>
- Ordóñez-Prado, C., Tamarit-Urias, J. C. and Rodríguez-Acosta, M., 2021. Sistema de ecuaciones aditivas para estimar biomasa aérea de tres especies de bambú. *Madera y Bosque*, En revisión y proceso de arbitraje.
- R Development Core Team, 2019. RStudio: Integrated Development for R. Boston, MA: RStudio, Inc. Recuperado de <https://www.rstudio.com/>
- Ramírez-Ojeda, G., Orozco-Gutiérrez, G., Barrera-Guzmán, L. A. and Ruiz-Sánchez, E., 2021. Edaphoclimatic diversity and ecological descriptors of *Guadua* bamboo species (*Poaceae: Bambusoideae*) in Mexico. *International Journal of Agriculture, Environment and Bioresearch*, 6(3), pp.228-244. <https://doi.org/10.35410/IJAEB.2021.5641>
- Riaño, N. M., Londoño, X., López, Y. and Gómez, J. H., 2002. Plant growth and biomass

- distribution on *Guadua angustifolia* Kunth in relation to ageing in Valle del Cauca-Colombia. Bamboo Science and Culture. *The Journal of the American Bamboo Society*, 16(1), pp.43-51. <http://www.maderinsa.com/guadua/fijacion.pdf>
- Rodríguez-Laguna, R., Jiménez-Pérez, J., Meza-Rangel, J., Aguirre-Calderón, O. and Razo-Zarate, R., 2007. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 4(2), pp.215-222. <https://www.itson.mx/publicaciones/rlrn/Documents/v4-n2-24-Carbono%20contenido%20en%20un%20bosque%20tropical%20subcaducifolio.pdf>
- Rodríguez-Larramendi, L. A., Guevara-Hernández, F., Reyes-Muro, L., Ovando-Cruz, J., Nahed-Toral, J., Prado-López, M. and Campos Saldaña, R. A., 2016. Estimación de biomasa y carbono almacenado en bosques comunitarios de la región Frailesca de Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7 (37), pp.77-94. <http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v7n37/2007-1132-remcf-7-37-00077.pdf>
- Ruiz-Sánchez, E., Tyrrel, C. D. and Vigosa, J. L., 2021a. An overlooked new *Rhipidocladum* species endemic to Mexico. *Systematic Botany*, 46(2), pp.333-338. <https://doi.org/10.1600/036364421X16231782047569>
- Ruiz-Sánchez, E., Castro-Castro, A. and Zamora-Tavares, M. P., 2021b. Molecular and morphological data support the recognition of a new species of *Oatea* (Poaceae: Bambusoideae: Guaduinae) from Durango, Mexico. *Taxon*, 70, pp.747-760. <https://doi.org/10.1002/tax.12462>
- Ruiz-Sánchez, E., Romero-Guzmán, R., Flores-Argüelles, A., Ortiz-Brunel, J. P. and Clark, L. G., 2021c. *Chusquea contrerasii* and *C. guzmanii* (Poaceae, Bambusoideae, Bambuseae, Chusqueinae), two new endemic species from Jalisco, Mexico. *Phytotaxa*, 497(3), pp.285-297. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.497.3.7>
- Setiawati, T., Zainal, M. A., Irawan, B., An'Amillah, A. and Iskandar, J., 2017. Species diversity and utilization of bamboo to support life's the community of Karangwangi Village, Cidaun Sub-District of Cianjur, Indonesia. *Biodiversitas*, 18(1), pp.58-64. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d180109>
- Vorontsova, M. S., Clark, L. G., Dransfield, J., Govaerts, R. and Baker, W. J., 2016. World Checklist of Bamboos and Rattans. Beijing, China: INBAR Technical Report number 37, pp.467. [https://www.researchgate.net/publication/316620295\\_World\\_Checklist\\_of\\_Bamboos\\_and\\_Rattans](https://www.researchgate.net/publication/316620295_World_Checklist_of_Bamboos_and_Rattans)
- Xu, L., Shi, Y., Zhou, G., Xu, X., Liu, E., Zhou, Y., Zhang, F., Li, C., Fang, H. and Chen, L., 2018. Structural development and carbon dynamics of Moso bamboo forests in Zhejiang Province, China. *Forest Ecology and Management*, 409, pp.479-488. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.11.057>
- Yen, T. M. and Lee, J. S., 2011. Comparing aboveground carbon sequestration between moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla*) and China fir (*Cunninghamia lanceolata*) forests based on the allometric model. *Forest Ecology and Management*, 261, pp.995-1002. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.12.015>
- Yuen, J. Q., Fung, T. and Ziegler, A. D., 2017. Carbon stocks in bamboo ecosystems worldwide: Estimates and uncertainties. *Forest Ecology and Management*, 393, pp.113-138. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.01.017>
- Zar, J. H., 2010. *Biostatistical analysis*. 5th ed. NJ, USA., Prentice Hall/Pearson.
- Ziccardi, L. G., de Alencastro Graça, P. M. L., Figueiredo, E. O. and Fearnside, P. M., 2019. Decline of large-diameter trees in a bamboo-dominated forest following anthropogenic disturbances in southwestern Amazonia. *Annals of Forest Science*, 76(110), pp.1-13. <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0901-4>
- Zhou, B., Fu, M., Xie, J., Yang, X. and Li, Z., 2005. Ecological functions of bamboo forest: Research and Application. *Journal of Forestry Research*, 16(2), pp.143-147. <https://doi.org/10.1007/BF02857909>