COMUNICACIONES
REPORTS
COMUNICAÇÕES

ESTRUCTURA, BIOMASA AÉREA Y CONTENIDO DE CARBONO EN EL PARQUE NACIONAL CUMBRES DE MONTERREY

José Israel Yerena Yamallel, Dulce Villanueva Hernández, Luis Gerardo Cuéllar Rodríguez, Eduardo Alanís Rodríguez y Homero Garate Escamilla

RESUMEN

Una de las medidas de mitigación para el cambio climático y conservar los ecosistemas es declarar más Áreas Naturales Protegidas debido a su potencial de almacenamiento de carbono. El objetivo del estudio fue analizar la estructura, estimar la biomasa aérea (BA) y el contenido de carbono (C) en cuatro tipos de vegetación, en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey. Se realizó un inventario forestal de 100 sitios de muestreo de 400m^2, donde se midió el diámetro normal (Dn), altura y diámetro de copa, de los árboles con Dn≥ 7,5cm. Las especies con mayor índice de valor de importancia fueron Quercus polymorpha *en el bosque de encino,* Abies vejarii *en encino-pino y* Pinus pseudostrobus *en los bosques de pino y pino-encino. La biomasa obtenida por tipo de vegetación mediante la utilización de ecuaciones alométricas y de volumen fue para pino-encino 93,10 ±11,41 y 113,47 ±7,66MgBA·ha^{-1}, encino-pino 117,33 ±5,07 y 129,16 ±7,24MgBA·ha^{-1}, pino 121,52 ±7,16 y 89,22 ±9,71MgBA·ha^{-1} y encino 138,00 ±7,59 y 118,96 ±13,94MgBA·ha^{-1}, respectivamente. Los resultados de contenido de carbono obtenidos son 67,41 ±3,69MgC·ha^{-1} para encino, 59,92 ±3,67MgC·ha^{-1} para pino, 57,10 ±2,29MgC·ha^{-1} para encino-pino y 45,34 ±5,24MgC·ha^{-1} para pino-encino. La utilización de ecuaciones alométricas y volumétricas son herramientas confiables para estimar indirectamente la biomasa aérea de los árboles, además el tiempo de medición es menor y no se afectan las poblaciones de las especies en comparación al método destructivo.*

Introducción

Las actividades antropogénicas han alterado el ciclo del carbono (C) a escala global como consecuencia de un aumento de los flujos de dióxido de carbono (CO_2) al perturbar los almacenes de C (Escobar *et al*., 2008). Tan solo las emisiones de CO_2 causadas por el ser humano por la quema de combustibles fósiles y cambio de uso de suelo aumentaron de 4,7 GtC·año^{-1} en los años 60 del siglo XX a 11,3 GtC·año^{-1} en el año 2017 (Le Quére *et al*., 2018).

En las últimas dos décadas, los bosques han capturado un

PALABRAS CLAVE / Área Natural Protegida / Bosques Templados / *Pinus* / *Quercus* / Servicios Ambientales /

Recibido: 30/08/2023 Modificado: 02/12/2023. Aceptado: 04/12/2023.

José Israel Yerena Yamallel (Autor para correspondencia) Ingeniero Forestal, Maestro en Ciencias Forestales y Doctor en Ciencias en Manejo de Recursos Naturales, Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), México. Profesor Investigador, Universidad Autónoma de Nuevo León, México. Dirección: Facultad de Ciencias Forestales, UANL. Carretera Nacional km 145, CP 67700, Linares, Nuevo León, México. e-mail: israel.yerena@gmail.com.

Dulce Villanueva Hernández. Ingeniera en Ciencias Ambientales, Instituto Tecnológico de Sonora, México. Maestra en Ciencias Forestales, UANL, México.

Luis Gerardo Cuéllar Rodríguez. Ingeniero Forestal y Maestro en Ciencias Forestales, UANL, México. Doctor en Ciencias en Fitosanidad – Entomología y Acarología, Colegio de Postgraduados, México. Profesor Investigador, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

Eduardo Alanís Rodríguez. Ingeniero Forestal, Maestro en Ciencias Forestales y Doctor en Ciencias en Manejo de Recursos Naturales, UANL, México. Profesor Investigador, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

Homero Garate Escamilla. Ingeniero Forestal, UANL, México. Maestro en Ciencias en Sistemas Ambientales, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México. Doctor en Ecología Evolutiva y Funcional, Universidad de Burdeos, Francia. Profesor Investigador, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

STRUCTURE, ABOVE-GROUND BIOMASS, AND CARBON CONTENT IN THE CUMBRES DE MONTERREY NATIONAL PARK

José Israel Yerena Yamallel, Dulce Villanueva Hernández, Luis Gerardo Cuéllar Rodríguez, Eduardo Alanís Rodríguez and Homero Garate Escamilla

SUMMARY

One of the mitigation actions for climate change and conserve ecosystems is to declare more Natural Protected Areas due to their carbon storage potential. The aim of the study was to analyze the structure, estimate the above-ground biomass (BA) and the carbon content (C) in four types of vegetation, in the Cumbres de Monterrey National Park. A forest inventory of 100 sampling sites of 400 m² were established, measuring the normal diameter (Dn), height and crown diameter, of trees with Dn ≥7,5 cm. The species with the highest importance value index were Quercus polymorpha *in the oak forest,* Abies vejarii *in oak-pine, and* Pinus pseudostrobus *in the pine and pine-oak forests. The biomass obtained by type of vegetation using allometric and volume equations was for pine-oak 93.10 ±11.41 and 113.47 ±7.66MgBA·ha^{-1}, oak-pine 117.33 ±5.07 and 129.16 ±7.24MgBA·ha^{-1}, pine 121.52 ±7,16 and 89.22 ±9.71MgBA·ha^{-1} and oak 138.00 ±7.59 and 118.96 ±13.94MgBA·ha^{-1}, respectively. The carbon content results obtained are 67.41 ±3.69MgC·ha^{-1} for oak, 59.92 ±3,67 MgC·ha^{-1} for pine, 57.10 ±2.29MgC·ha^{-1} for oak-pine and 45.34 ±5.24MgC·ha^{-1} for pine-oak. The use of allometric and volumetric equations are reliable tools to indirectly estimate the above-ground biomass of the trees, in addition the measurement time is shorter, and the populations of the species are not affected compared to the destructive method.*

ESTRUTURA, BIOMASSA ACIMA DO SOLO E CONTEÚDO DE CARBONO NO PARQUE NACIONAL CUMBRES DE MONTERREY

José Israel Yerena Yamallel, Dulce Villanueva Hernández, Luis Gerardo Cuéllar Rodríguez, Eduardo Alanís Rodríguez e Homero Garate Escamilla

RESUMO

Uma das medidas de mitigação das mudanças climáticas e de conservação dos ecossistemas é declarar mais Áreas Naturais Protegidas devido ao seu potencial de armazenamento de carbono. O objetivo do estudo foi analisar a estrutura, estimar a biomassa acima do solo (BA) e o conteúdo de carbono (C) em quatro tipos de vegetação no Parque Nacional Cumbres de Monterrey. Foi realizado um inventário florestal de 100 locais de amostragem de 400 m², onde foram medidos o diâmetro normal (Dn), a altura e o diâmetro da copa das árvores com Dn ≥7,5 cm. As espécies com o maior índice de valor de importância foram Quercus polymorpha *na floresta de carvalhos,* Abies vejarii *na floresta de carvalhos e pinheiros e* Pinus pseudostrobus *nas florestas de pinheiros e pinheiros-carvalhos. A biomassa obtida por tipo de vegetação usando equações alométricas e de volume foi de 93,10 ±11,41 e 113,47 ±7,66MgBA·ha^{-1} para o pinheiro-manso, 117,33 ±5,07 e 129,16 ±7,24MgBA·ha^{-1} para o pinheiro-manso, 121,52 ±7,16 e 89,22 ±9,71MgBA·ha^{-1} para o pinheiro-manso e 138,00 ±7,59 e 118,96 ±13,94MgBA·ha^{-1} para o carvalho, respectivamente. Os resultados do conteúdo de carbono obtidos são 67,41 ±3,69MgC·ha^{-1} para o carvalho, 59,92 ±3,67MgC·ha^{-1} para o pinheiro, 57,10 ±2,29MgC·ha^{-1} para o carvalho-pinheiro e 45,34 ±5,24MgC·ha^{-1} para o pinheiro-carvalho. O uso de equações alométricas e volumétricas são ferramentas confiáveis para estimar indiretamente a biomassa acima do solo das árvores; além disso, o tempo de medição é mais curto e as populações de espécies não são afetadas em comparação com o método destrutivo.*

tercio de las emisiones de C producidas por la quema de combustibles fósiles (Birdsey *et al*., 2013). Por tal motivo es importante estudiar los bosques y los impactos de las actividades humanas que alteran el ciclo del C, ya que dichos ecosistemas fijan este elemento desde la atmósfera (Ciais *et al*., 2013).

La dinámica, la estructura y composición de un bosque son la base para entender su papel en la captura del CO_2 atmosférico (Alvis, 2009). Para realizar el análisis de la distribución horizontal de un bosque es necesario establecer variables como abundancia, dominancia y frecuencia de las especies (Holguín-Estrada *et al*., 2021).

Las Áreas Naturales Protegidas (ANP), en las que se limitan las actividades antropogénicas son ideales para realizar este tipo de estudios que pueden contribuir a paliar el cambio climático y conservar los ecosistemas. En México hay 182 ANP federales con una extensión de 908395,20km^2 administradas por la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) (CONABIO, 2012).

Una de esas ANP en México, es El Parque Nacional Cumbres de Monterrey (PNCM) considerada como región terrestre prioritaria e isla biogeográfica, cuenta con 177396,48ha de superficie. Por el buen estado de conservación del bosque de pino y el chaparral es considerado de alto valor ecológico, cumple una función destacada como corredor biológico, ya que une áreas de bosque templado con áreas más secas ubicadas al norte de ésta (CONANP, 2006).

El objetivo del trabajo fue analizar la estructura, estimar la biomasa aérea y el contenido de carbono en cuatro tipos de vegetación en El Parque Nacional Cumbres de Monterrey. Este trabajo plantea dos hipótesis: la primera señala que las estimaciones de biomasa aérea basadas en ecuaciones alométricas y volumétricas presentan diferencias estadísticas significativas; la segunda postula que existen diferencias estadísticas significativas en el

contenido de carbono entre tipos de vegetación.

Materiales y Métodos

Área de estudio

Se localiza en los bosques templados del PNCM, en la región oeste-centro del estado de Nuevo León, México (Figura 1). Presenta climas semicálido y templado subhúmedo (García, 1998), y altitud en el rango de 600 a los 3200 msnm (CONABIO, 1998). La temperatura media anual en la zona varía de 8 a 22°C y la precipitación anual de 300 hasta 1000mm (Cuervo-Robayo *et al*., 2014a, 2014b).

Tamaño y diseño de la unidad muestral

Se seleccionaron cuatro tipos de vegetación que presentaron mayor superficie dentro del PNCM: bosque de encino, bosque de pino-encino, bosque de pino y bosque de encino-pino. Se realizaron 25 sitios de muestreo por tipo de vegetación, en total 100 sitios, la distribución fue sistemática. Los sitios de muestreo se basaron en el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) que realiza la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2018). El área de cada sitio de muestreo fue de 400m^2 (radio= 11,28m). Los árboles medidos fueron aquellos con diámetro normal ≥7,5cm. Las variables dasométricas tomadas en campo para la caracterización de este estrato fueron: diámetro normal a 1,3m, diámetros de copa y altura total.

Características estructurales

Distribución de individuos por categoría diamétrica. Para obtener la distribución por tipo de vegetación se utilizó la información de las especies arbóreas registradas. Con esto, se realizó una tabla de frecuencia por categoría diamétrica con intervalos de 5cm de amplitud.

Parámetros ecológicos. Se estimó el Índice de Valor de Importancia (IVI), basado en una ponderación que toma en cuenta el promedio de la dominancia, densidad y frecuencia relativa, otorga mayor valor a las especies que dominen al ecosistema, además aporta elementos cuantitativos fundamentales en el análisis ecológico (Lozada-Dávila, 2010). La dominancia relativa es la proporción de una especie en el área basal total evaluada, mientras que, la densidad relativa es la proporción de cada especie en el número total de individuos de todas las especies; y la frecuencia relativa es el porcentaje de veces que ocurre una especie en los sitios de muestreo. Para el cálculo de cada especie por tipo vegetación se emplearon las siguientes fórmulas (Mostacedo y Fredericksen, 2000):

$$\text{Indice de valor de importancia (IVI)} = \frac{\text{Dominancia relativa} + \text{Densidad relativa} + \text{Frecuencia relativa}}{3}$$

donde:

$$\text{Dominancia relativa} = \left(\frac{\text{Dominancia absoluta por especie}}{\text{Dominancia absoluta de todas las especies}}\right) * 100$$

donde:

$$\text{Dominancia absoluta} = \frac{\text{Área basal de una especie}}{\text{Área muestreada}}$$

$$\text{Densidad relativa} = \left(\frac{\text{Densidad absoluta por especie}}{\text{Densidad absoluta de todas las especies}}\right) * 100$$

donde:

$$\text{Densidad absoluta} = \frac{\text{Número de individuos de una especie}}{\text{Área muestreada}}$$

$$\text{Frecuencia relativa} = \left(\frac{\text{Frecuencia absoluta por especie}}{\text{Frecuencia absoluta de todas las especies}}\right) * 100$$

donde:

$$\text{Frecuencia absoluta} = \frac{\text{Número de sitios en los que se presenta una especie}}{\text{Número total de sitios muestreados}}$$

Biomasa aérea y contenido de carbono

Estimación de la biomasa aérea mediante ecuaciones alométricas. Una forma de estimar la biomasa aérea de los árboles es mediante ecuaciones alométricas establecidas específicamente para ese propósito. A partir de las características dasométricas de los diferentes tipos de vegetación y de especies existentes en el área, se revisó literatura y se seleccionaron ecuaciones alométricas específicas para evaluar la biomasa aérea de las especies (Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez, 2011; Avendaño-Hernández *et al*., 2009; Chojnacky *et al*., 2013; Grier *et al*., 1992; Marroquín-Morales *et al*., 2018; Vargas-Larreta *et al*., 2017). Las variables utilizadas fueron diámetro y altura (Tabla I).

Estimación de biomasa aérea desde el volumen. Otra forma de estimar la biomasa aérea fue a partir de estimaciones de volumen:

$$BA = v * dm * Fexp \qquad (1)$$

donde BA: biomasa aérea (kg), v: volumen del árbol (m^3), dm: densidad de la madera (kg·m^{-3}), Fexp: factor de expansión (kg·m^{-3}), relación entre la biomasa total y la biomasa de fuste.

$$v = \left(\frac{\pi}{4}\right) * d^2 * h * f \qquad (2)$$

donde v: volumen del árbol (m^3), d: diámetro normal (m), h: altura del árbol (m), f: factor de forma o coeficiente mórfico (es la relación que existe entre el volumen real del tronco y el modelo que se toma como referencia, el valor es diferente entre las especies).

Para determinar el contenido de carbono a partir de la biomasa aérea se utilizó la concentración de carbono por especie según lo reportado en la literatura (Jiménez *et al*., 2013; Yerena *et al*., 2012) (Tabla II), en las especies que se desconoce la concentración de carbono se optó por el factor de conversión del 0,5 recomendado por el IPCC (2007).

Contenido de carbono. Se obtuvo de la relación de la biomasa aérea por la concentración de carbono de las especies arbóreas.

$$\text{Contenido de carbono} = BA * CC \qquad (3)$$

donde BA: biomasa aérea (peso seco de los árboles, kg), CC: concentración de carbono (%).

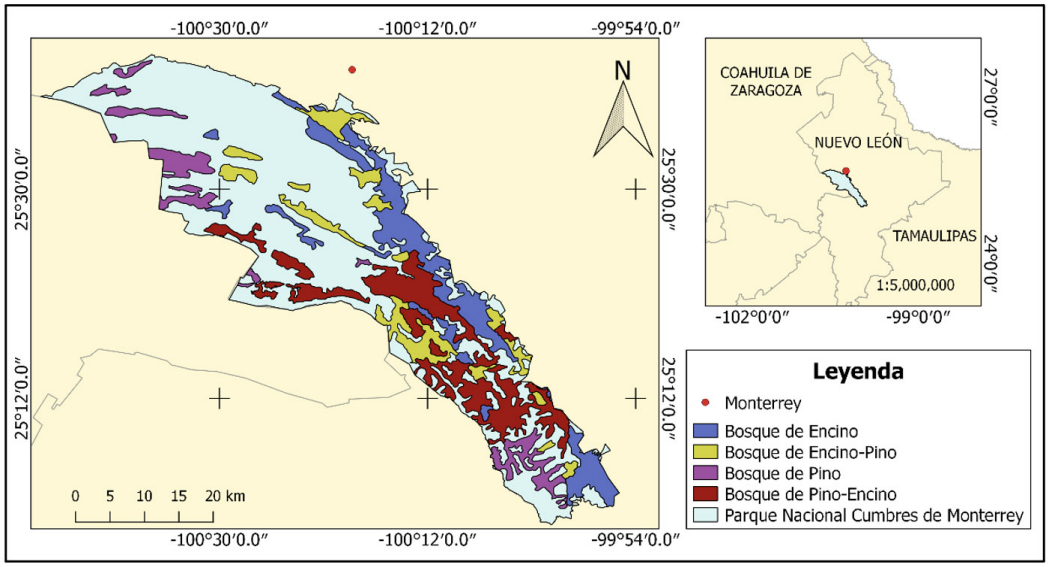

Figura 1. Localización del área de estudio.

TABLA I
ECUACIONES ALOMÉTRICAS UTILIZADAS PARA ESTIMAR BIOMASA AÉREA

Especie	Ecuación
Abies vejarii Martínez	$BA= 0{,}0713 \cdot d^{2{,}5104}$
Arbutus spp	$Ww= 0{,}06438\ d^{1{,}66448}\ h^{0{,}86489}$
	$Wb= 0{,}00328\ d^{1{,}51833}\ h^{0{,}95083}$
	$Wbr= 0{,}02125\ d^{1{,}81216}\ h^{0{,}8198}$
	$Wf= 0{,}00698\ d^{1{,}50325}\ h^{0{,}84794}$
Colubrina greggii S. Watson	$\ln(BA) = -2{,}2118 + 2{,}4133 \cdot \ln(d)$
Cercis canadensis L. var. mexicana (Rose) M. Hopkins	$\ln(BA) = -2{,}5095 + 2{,}6175 \cdot \ln(d)$
Juglans mollis Hemsl.	$\ln(BA) = -2{,}5095 + 2{,}6175 \cdot \ln(d)$
Juniperus monosperma (Engelm.) Sarg.	$\log(BA) = 1{,}157 + 2{,}086 \cdot \log(d)$
Pinus cembroides Zucc.	$\ln(BA)= 5{,}078 - 3{,}764 \cdot \ln(d) + 1{,}284 \cdot \ln(d)^2$
Pinus pseudoustrobus Lindl.	$BA= 0{,}35179 \cdot d^{2}$
Pinus teocote Schiede ex Schltdl. et Cham.	$BA= 0{,}40196 \cdot d^{2}$
Quercus spp	$BA= 0{,}45534 \cdot d^{2}$

BA: biomasa aérea (kg); d: diámetro normal (cm); h: altura total (m); Ww: biomasa de madera del tallo (kg); Wb: biomasa de la corteza del tallo (kg); Wbr : biomasa de la madera más la corteza de las ramas (kg); Wf: biomasa de las hojas (kg); Wt: biomasa aérea total (Ww + Wb + Wbr + Wf) (kg).

TABLA II
CONCENTRACIÓN DE CARBONO PARA LAS ESPECIES DEL ESTUDIO

Especie	CC
Abies vejarii	47,35
Juniperus monosperma	49,11
Pinus cembroides	50,25
Pinus pseudoustrobus	50,35
Pinus teocote	47,48
Arbutus xalapensis H.B.K.	51,17
Quercus canbyi Trel.	49,14
Quercus laceyi Small	48,18
Quercus rysophylla Weath.	47,98

CC: concentración de carbono.

Análisis estadístico. Cuando los datos cumplieron con los criterios de normalidad y homocedasticidad en las variables, mediante el programa *Statistica Advanced* se efectuó una prueba t-Student para determinar si existen diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0{,}05$) entre las estimaciones de biomasa basadas en ecuaciones alométricas y volumétricas por tipo de vegetación, posteriormente, se realizó un Análisis de Varianza (ANDEVA) para comprobar si existen efectos significativos en el contenido de carbono entre tipos de vegetación. A las variables que presentaron diferencias significativas, se aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0{,}05$).

Resultados y Discusión

Características estructurales

En el bosque de encino se registró en promedio 695 individuos ha^{-1}, en las categorías diamétrica de 10, 15 y 20cm, que corresponden a 24,5, 20,1 y 18,7% de la densidad, respectivamente, de la población medida. Esto es 63,3% de los individuos se ubicó en esas tres primeras categorías. En el bosque de encino-pino se contabilizaron 726 individuos ha^{-1}, de los cuales 31,0, 27,0 y 17,2%, se localiza en las categorías diamétrica anteriormente señaladas. En el bosque de pino se obtuvo el 18,4% de los individuos en la categoría de 10cm, el 29,1% en 15cm y 23,2% en 20cm, en conjunto las primeras categorías representan el 70,7%, en este tipo de vegetación se presentó un total de 645 individuos ha^{-1}. Se estimó 684 individuos ha^{-1} en el bosque de pino-encino, el 39,6% se presentó en la categoría de 10cm, el 20,7% en 15cm y el 15,7% en 20cm, generando un 76% (Tabla III).

Los bosques del PNCM muestran la estructura horizontal similar a lo reportado por Rodríguez *et al*. (2006) en el bosque de niebla en la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas, México, donde la mayoría de los individuos se presentan en las primeras clases diamétricas, una tendencia de heterogeneidad.

El bosque de pino-encino presentó mayor riqueza con 13 especies en comparación a los otros tipos de vegetación y el bosque de pino la menor con cinco especies. *Pinus teocote* y *Quercus polymorpha* son especies que se encuentran en todos los tipos de vegetación estudiadas. En el bosque de

TABLA III
NÚMERO DE INDIVIDUOS (ha^{-1}) POR CLASE DIAMÉTRICA (cm) Y TIPO DE VEGETACIÓN

Clase diamétrica	Pino-Encino	Encino-Pino	Pino	Encino
10	271	225	119	170
15	142	196	188	140
20	108	125	150	130
25	75	67	75	110
30	38	42	44	70
35	42	29	25	55
40	8	29	19	15
45		13	13	5
50			6	
55			0	
60			0	
65			6	
Total	684	726	645	695

encino las especies con el mayor IVI fueron *Quercus polymorpha* (52,3%) y *Cercis canadensis* (11,8%). En los sitios con encino-pino *Abies vejarii* (30,6%) y *Quercus polymorpha* (18,0%), el género *Quercus* es el que tiene mayor porcentaje de representatividad. En cuanto al tipo de vegetación de especies pináceas *Pinus pseudostrobus* (49,9%) y *Pinus cembroides* (18,3%) resultaron ser las más abundantes. En las áreas dominadas por pino-encino, *Pinus pseudostrobus* (31,5%) y *Pinus teocote* (23,9%) fueron las más representadas. En la Tabla IV se muestran los valores de dominancia relativa, densidad relativa, frecuencia relativa e índice de valor de importancia de las especies.

Al respecto, Buendía-Rodríguez *et al*. (2019) evaluaron áreas con asociación de pino-encino y encino-pino, localizadas al sur del estado de Nuevo León, citan a *Pinus teocote* y *Pinus ayacahuite* con los mayores valores de IVI, en contraste con los bosques templados del PNCM, donde *Pinus teocote* tuvo una presencia en todos los tipos de vegetación, sin embargo, en ninguno obtuvo el IVI más alto y no se registró el *Pinus ayacahuite*.

Alanís-Rodríguez *et al*. (2012) estudiaron un bosque de pino-encino con recurrencia de incendios en el Parque Ecológico Chipinque (perteneciente al PNCM) y reportaron a las especies *Quercus rysophylla*, *Quercus canbyi* y *Quercus laceyi* con los valores más altos de IVI, resultados similares a los de este estudio.

Graciano-Ávila *et al*. (2017) caracterizaron la estructura y diversidad de especies arbóreas en bosques de pino-encino localizado al noroeste de México, y encontraron que el

TABLA IV
PARÁMETROS ECOLÓGICOS DE LAS ESPECIES POR TIPO DE VEGETACIÓN

Especie	Dominancia relativa	Densidad relativa	Frecuencia relativa	IVI
		Pino-Encino		
Pinus pseudostrobus	40,7	40,2	13,6	31,5
Pinus teocote	31,3	26,8	13,6	23,9
Pinus cembroides	8,9	12,8	9,1	10,3
Quercus rysophylla	8,5	9,1	9,1	8,9
Quercus laurina M. Martens & Galeotii	2,7	2,4	9,1	4,8
Quercus laceyi	1,4	1,8	9,1	4,1
Quercus polymorpha Schlecht. & Cham.	1,9	1,2	9,1	4,1
Juglans mollis	1,2	1,8	4,5	2,5
Arbutus xalapensis	1,1	1,2	4,5	2,3
Colubrina greggii	0,6	0,6	4,5	1,9
Quercus canbyi	0,6	0,6	4,5	1,9
Quercus mexicana Humb. & Bonpl.	0,5	0,6	4,5	1,9
Juniperus monosperma	0,5	0,6	4,5	1,9
		Encino-Pino		
Abies vejarii	36,9	35,1	20,0	30,6
Quercus polymorpha	15,6	18,4	20,0	18,0
Pinus pseudostrobus	18,7	17,8	16,0	17,5
Quercus mexicana	14,6	14,4	20,0	16,3
Juglans mollis	4,6	4,6	12,0	7,1
Quercus laceyi	6,4	6,3	4,0	5,6
Arbutus xalapensis	2,3	2,9	4,0	3,0
Pinus teocote	0,9	0,6	4,0	1,8
		Pino		
Pinus pseudostrobus	57,7	61,2	30,8	49,9
Pinus cembroides	10,7	13,6	30,8	18,3
Quercus laceyi	21,5	15,5	15,4	17,5
Pinus teocote	9,7	8,7	15,4	11,3
Quercus polymorpha	0,5	1,0	7,7	3,0
		Encino		
Quercus polymorpha	63,6	61,9	31,3	52,3
Cercis canadensis	12,1	10,8	12,5	11,8
Quercus canbyi	10,1	12,9	6,3	9,8
Quercus rysophylla	6,9	5,0	12,5	8,1
Pinus teocote	2,8	2,2	12,5	5,8
Juglans mollis	2,2	3,6	6,3	4,0
Quercus intricata Trel.	1,4	2,2	6,3	3,3
Arbutus xalapensis	0,6	0,7	6,3	2,5
Colubrina greggii	0,3	0,7	6,3	2,4

IVI: Índice de Valor de Importancia.

género *Pinus* como más abundante y dominante, seguido por *Quercus*, los géneros más frecuentes fueron *Pinus* y *Juniperus*, resultados similares a los de este estudio. Las especies con los valores de IVI más altos fueron *Pinus cooperi*, *Pinus durangensis* y *Quercus sideroxyla*, estas no se registraron en los bosques templados del PNCM.

Biomasa aérea y contenido de carbono

La mayor biomasa aérea estimada con ecuaciones alométricas y el contenido de C fue en el estrato arbóreo con 138,00 ±7,59MgBA·ha^{-1} y 67,41 ±3,69MgC·ha^{-1}, respectivamente, mientras que el menor valor fue de 93,10 ±11,41MgBA·ha^{-1} y 45,34 ±5,24MgC·ha^{-1} en el bosque de pino-encino. A partir de la ecuación del volumen, resultó ser el bosque de encino-pino con la cantidad más alta de 129,16 ±7,24MgBA·ha^{-1} y 63,00 ±3,19MgC·ha^{-1}, el bosque de pino la más baja con 89,22 ±9,71MgBA·ha^{-1} y 43,96 ± 4,57MgC·ha^{-1} (Tabla V).

Las estimaciones de biomasa aérea hechas mediante ecuaciones alométricas y la ecuación de volumen para el bosque de pino fueron significativamente diferentes (P> 0,05), sin embargo, las del bosque de encino, encino-pino y pino-encino no mostraron diferencias significativas entre sí, por lo que se concluye que ambas metodologías resultaron ser confiables en estos tres últimos tipos de vegetación.

El análisis de varianza de los contenidos de carbono de los tipos de vegetación analizados, estimados con las ecuaciones alométricas, mostró la existencia de diferencias significativas (P < 0,0001). La prueba de comparación de medias de Tukey (α= 0,05) expuso que el bosque de pino-encino y el bosque de encino son estadísticamente diferente entre sí (Tabla V).

Los valores de biomasa aérea de este estudio estimados mediante ecuaciones alométricas y volumétricas son similares a los reportados en los siguientes trabajos: Mendoza-Ponce y Galicia (2010) en bosques templados en Cofre de Perote, Veracruz, citan valores de biomasa aérea de 73,63 a 372MgBA·ha^{-1} con la aplicación de ecuaciones alométricas; Domínguez-Cabrera *et al*. (2009) estimaron la biomasa en bosques de pino del sur de Nuevo León, en 125,33MgBA·ha^{-1}, en bosque de encino-pino en 112,59MgBA·ha^{-1} y en bosque de pino-encino en 96,68MgBA·ha^{-1}; Návar-Cháidez (2010) menciona haber medido una biomasa para bosques del estado de Nuevo León de 74,16MgBA·ha^{-1}.

El contenido de carbono en bosques de pino-encino del sur de Nuevo León, determinado por Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez (2011) fue 45,24MgC·ha^{-1} y un bosque de encino-pino 64,20MgC·ha^{-1}. Galeana-Pizaña *et al*. (2013) estimaron el contenido de carbono en bosques irregulares en la Cuenca del río Magdalena en la Ciudad de México, un rango de 21,21 a 162,91MgC·ha^{-1}. Por su parte, Rodríguez-Laguna *et al*. (2009) reportaron que un bosque de pino-encino de la Reserva de la biosfera El Cielo, Tamaulipas, tenía 82,91MgC·ha^{-1}. Todas estas investigaciones citan cantidades similares de C acumulado por hectárea a los del presente trabajo.

El almacenamiento de C en las clases diamétricas 25, 30 y 35cm de los árboles del bosque de encino resultó ser 13,92, 12,02 y 13,60MgC·ha^{-1}, respectivamente, mayor que en la clase 45cm que almacenó una menor cantidad de carbono. En los bosques de encino-pino y pino, la clase 20cm fue la que tuvo mayor acumulación con 9,88 y 11,40MgC·ha^{-1}, respectivamente. En el bosque de pino-encino las clases 35 y 25cm fueron las que contenían más C y la clase 40cm la que contenía menos. La clase 10cm fue la que almacenó menor contenido de C en los bosques de encino-pino y pino, en encino y pino-encino se localiza entre las clases diamétricas con menor contenido (Tabla VI).

El potencial de almacenamiento de C en un bosque depende de la composición de especies, estructura, clases diamétricas y características físicas del ecosistema (Pardos, 2010). En los cuatro tipos de vegetación la mayoría de los individuos se presentaron en las primeras clases dimétricas, dando la J invertida. Se localizan en etapa activa de desarrollo de latizales lo que se

TABLA V
BIOMASA AÉREA Y CONTENIDO DE CARBONO (Mg·ha^{-1}), POR MÉTODO DE ESTIMACIÓN

Tipo de vegetación	BA EA Media ± EE	BA EV Media ± EE	CC EA Media[1] ± EE	CC EV Media ± EE
Pino-Encino	93,10 ± 11,41[a]	113,47 ± 7,66[a]	45,34 ± 5,24[a]	55,38 ± 3,32
Encino-Pino	117,33 ± 5,07[a]	129,16 ± 7,24[a]	57,10 ± 2,29[ab]	63,00 ± 3,19
Pino	121,52 ± 7,16[a]	89,22 ± 9,71[b]	59,92 ± 3,67[ab]	43,96 ± 4,57
Encino	138,00 ± 7,59[a]	118,96 ± 13,94[a]	67,41 ± 3,69[b]	58,15 ± 6,79

BA: Biomasa aérea; CC: Contenido de carbono; EA: Ecuación alométrica; EV: Ecuación volumen; EE: error estándar de la muestra; [1] Letras iguales son estadísticamente similares ($P \leq 0,05$).

TABLA VI
CONTENIDO DE CARBONO POR CLASE DIAMÉTRICA

Clase diamétrica	Pino-Encino MgC·ha^{-1}	Encino-Pino MgC·ha^{-1}	Pino MgC·ha^{-1}	Encino MgC·ha^{-1}
10	4,18	3,73	2,32	3,41
15	5,62	8,66	7,30	6,93
20	7,84	9,88	11,40	10,77
25	9,22	7,73	8,59	13,92
30	6,39	6,67	6,28	12,02
35	9,73	6,64	5,57	13,60
40	2,36	9,29	5,90	5,00
45		4,50	4,84	1,76
50			3,16	
55			0,00	
60			0,00	
65			4,56	
Total	45,34	57,10	59,92	67,41

considera árboles en etapa juvenil con transición a juvenil-adultos, sin embargo, esto no significa que en estas categorías se almacene la mayor cantidad de carbono. Yepes *et al*. (2016) reportaron que la biomasa aérea se encuentra principalmente en los árboles con diámetros grandes. En el bosque de encino la clase diamétrica 10cm fue la que resultó con el mayor número de individuos con 170 individuos ha^{-1}, no obstante, se estima que solamente almacena 3,4MgC·ha^{-1}, en comparación con las clases 25 y 35cm que contienen 13,9 y 13,6MgC·ha^{-1} con 110 y 55 individuos ha^{-1} respectivamente, o con la clase diamétrica 45cm, que únicamente tiene presencia de 5 individuos ha^{-1} pero almacena 1,8MgC·ha^{-1}. En el bosque de pino en la clase diamétrica 15cm existe la mayor densidad de árboles con 188 individuos ha^{-1}, que almacenan un promedio de 7,3MgC·ha^{-1}, la clase diamétrica 20cm es la que se estima que tiene el mayor contenido de C, esto es 11,4MgC·ha^{-1} en 150 individuos ha^{-1}. En las clases 50 y 65cm solamente se contabilizaron 6 individuos ha^{-1} que almacenaban 3,2 y 4,6MgC·ha^{-1}, respectivamente.

En los bosques mixtos, comparando con los bosques puros, se registró un mayor número de árboles en la clase diamétrica 10cm con 271 y 225 individuos ha^{-1} pero solo almacenan 4,2 y 3,7MgC·ha^{-1}, respectivamente. En el bosque de encino-pino la clase con mayor contenido de carbono fue la de 20cm con 9,9MgC·ha^{-1} y una densidad de 125 individuos ha^{-1}, sin embargo, la clase diamétrica de 40cm almacenaba 9,3MgC·ha^{-1} con 29 individuos ha^{-1}. En el bosque de pino-encino el mayor contenido de C se presentó en la categoría de 35cm con 9,7MgC·ha^{-1} y 42 individuos ha^{-1}.

En bosques con alta densidad de árboles, ésta puede provocar estrés hídrico, condición que se encuentra relacionada con una disminución en la productividad (Candel-Pérez *et al*., 2017). Los bosques de encino-pino presentaron una densidad arbórea mayor en comparación con el bosque de encino, de igual manera el bosque de pino-encino y el bosque de pino, por lo que en los bosques mixtos existe una mayor competencia por los recursos dando como resultado un menor almacenamiento de carbono. Los bosques mixtos con manejo adecuado podrían proporcionar estrategias de adaptación ante el cambio climático (González de Andrés *et al*., 2018).

Conclusiones

Las especies con mayor índice de valor de importancia fueron *Quercus polymorpha* en el bosque de encino, *Abies vejarii* en encino-pino y *Pinus pseudostrobus* en los bosques de pino y pino-encino. En el bosque de pino se observaron diferencias en las estimaciones de biomasa aérea utilizando ecuaciones alométricas y la de volumen, por lo que la primera hipótesis no se rechaza para este tipo de vegetación. Sin embargo, para el bosque de encino, encino-pino y pino-encino no resultaron diferencias, por lo que ambas metodologías son confiables. El mayor contenido de carbono acumulado en los bosques experimentales se presentó en el bosque de encino y el menor en el bosque de pino-encino, las medias fueron significativamente diferentes entre estos tipos de vegetación, por lo que la segunda hipótesis no se rechaza. La utilización de ecuaciones alométricas y volumétricas son herramientas confiables para estimar indirectamente la biomasa aérea de los árboles, además el tiempo de medición es menor y no se afectan las poblaciones de las especies en comparación al método destructivo.

REFERENCIAS

Aguirre-Calderón OA, Jiménez-Pérez J (2011) Evaluación del contenido de carbono en bosques del Sur de Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales 2*: 73-83.

Alanís-Rodríguez E, Jiménez-Pérez J, Valdecantos-Dema A, González-Tagle M, Aguirre-Calderón O, Treviño-Garza E (2012) Composición y diversidad de la regeneración natural en comunidades de *Pinus-Quercus* sometidas a una alta recurrencia de incendios en el noreste de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad 83*: 1208-1214.

Alvis GJ (2009) Análisis estructural de un bosque natural localizado en zona rural del municipio de Popayan. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial 7: 115-122.

Avendaño-Hernández DM, Acosta-Mireles M, Carillo-Anzures F, Etchevers-Barra JD (2009) Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Revista Fitotecnia Mexicana 32*: 233-238.

Birdsey R, Pan Y, Houghton R (2013) Sustainable land scapes in a world of change: Tropical forests, land use and implementation of REDD+: Part I. *Carbon Management 4*: 465-468.

Buendía-Rodríguez E, Treviño-Garza E, Alanís-Rodríguez E, Aguirre-Calderón O, González-Tagle M, Pompa-García M (2019) Estructura de un ecosistema forestal y su relación con el contenido de carbono en el noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales 10*: 4-25.

Candel-Pérez D, Blanco JA, González de Andrés E, Lo YH, Imbert JB, Castillo F (2017) Simulando la interacción entre la densidad inicial y los flujos de agua y nutrientes para comprender el desarrollo de rodales mixtos de *Pinus sylvestris* y *Fagus sylvatica* bajo cambio climático. *Ecosistemas 26*: 38-51.

Chojnacky DC, Heath LS, Jenkins JC (2013) Updated generalized biomass equations for North American trees species. *Forestry 87*: 129-151.

Ciais P, Sabine C, Bala G, Bopp L, Brovkin V, Canadell J, Chhabra A, DeFries R, Galloway J, Heimann M, Jones C, Le Quéré C, Myneni R, Piao S, Thornton P (2013) Carbon and other biogeochemical cycles. In Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (Eds.), *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, EE.UU. pp. 465-570.

CONANP (2006) *Parque Nacional Cumbres de Monterrey - Programa de Conservación y Manejo*. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Monterrey, Nuevo León, México. 179 pp.

CONAFOR (2018) *Inventario Nacional Forestal y de Suelos, Informe de Resultados 2009-2014*. Comisión Nacional Forestal, Zapopan, Jalisco, México. 200 pp.

CONABIO (2012) *Áreas Protegidas en México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Tlalpan, Ciudad de México, México.

CONABIO (1998) *Curvas de nivel para la República Mexicana, escala 1:250000*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Tlalpan, Ciudad de México, México.

Cuervo-Robayo AP, Téllez-Valdés O, Gómez-Albores MA, Venegas-Barrera CS, Manjarrez J, Martínez-Meyer E (2014) *Temperatura media anual en México (1910-2009), escala 1:1000000*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Tlalpan, Ciudad de México, México.

Cuervo-Robayo AP, Téllez-Valdés O, Gómez-Albores MA, Venegas-Barrera CS, Manjarrez J, Martínez-Meyer E (2014) *Precipitación anual en México (1910-2009), escala 1:1000000*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Tlalpan, Ciudad de México, México.

Domínguez-Cabrera G, Aguirre-Calderón OA, Jiménez-Pérez J, Rodríguez-Laguna R, Díaz-Balderas JA (2009) Biomasa aérea y factores de expansión de especies arbóreas en bosques del sur de Nuevo León. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 15*: 59-64.

Escobar E, Maass M, Alcocer J, Azpra E, Falcón L, Gallegos A, Javier F, García-Oliva F, Jaramillo V, Lecuanda R, Magaña V, Martínez-Yrízar A, Muhlia A, Rodríguez R, Zavala-Hidalgo J (2008) Diversidad de procesos funcionales en los ecosistemas. In Soberón J, Halffter G, Llorente-Bousquets J (Eds.), *Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*. Tlalpan, Ciudad de México, México. pp. 161-189.

Galeana-Pizaña JM, Ordóñez-Díaz JB, Corona-Romero N (2013)

Estimación de contenido de carbono en la cuenca del río Magdalena, México. *Madera y Bosques 19*: 53-69.

García E (1998) *Climas, escala 1:1000000*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Tlalpan, Ciudad de México, México.

Graciano-Ávila G, Aguirre-Calderón O, Alanís-Rodríguez E, Lujan-Soto J (2017) Composición, estructura y diversidad de especies arbóreas en un bosque templado del Noroeste de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 4*: 535-542.

González de Andrés E, Camarero J, Blanco J, Bosco-Imbert J, Lo YH, Sangüesa-Barreda G, Castillo F (2018) Tree-to-tree competition in mixed European beech-Scots pine forests has different impacts on growth and water-use efficiency depending on site conditions. *Journal of Ecology 106*: 59-75.

Grier CC, Elliott KJ, McCullough DG (1992) Biomass distribution and productivity of *Pinus edulis - Juniperus monosperma* woodlands of north-central Arizona. *Forest Ecology and Management 50*: 331-350.

Holguín-Estrada VA, Alanís-Rodríguez E, Aguirre-Calderón O, Yerena-Yamallell JI, Pequeño-Ledezma MÁ (2021) Estructura y composición florística de un bosque de galería en un gradiente altitudinal en el noroeste de México. *Madera y Bosques 27*: 1-16.

IPCC (2007) *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Ginebra, Suiza. 104 pp.

Jiménez J, Treviño EJ, Yerena JI (2013) Concentración de carbono en especies del bosque de pino-encino en la Sierra Madre Oriental. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales 4*: 50-61.

Le Quéré C, Andrew RM, Friedlingstein P, Sitch S, Hauck J, Pongratz J, Pickers PA, Korsbakken JI, Peters GP, Canadell JG, Arneth A, Arora VK, Barbero L, Bastos A, Bopp L, Chevallier F, Chini LP, Ciais P, Doney SC, Gkritzalis T, Goll DS, Harris I, Haverd V, Hoffman FM, Hoppema M, Houghton RA, Hurtt G, Ilyina T, Jain AK, Johannessen T, Jones CD, Kato E, Keeling RF, Goldewijk KK, Landschützer P, Lefèvre N, Lienert S, Liu Z, Lombardozzi D, Metzl N, Munro DR, Nabel MS, Nakaoka S, Neill C, Olsen A, Ono T, Patra P, Peregon A, Peters W, Peylin P, Pfeil B, Pierrot D, Poulter B, Rehder G, Resplandy L, Robertson E, Rocher M, Rödenbeck C, Schuster U, Schwinger J, Séférian R, Skjelvan I, Steinhoff T, Sutton A, Tans PP, Tian H, Tilbrook B, Tubiello FN, van der Laan-Luijkx IT, van der Werf GR, Viovy N, Walker AP, Wiltshire AJ, Wright R, Zaehle S, Zheng B (2018) Global Carbon Budget 2018. *Earth System Science Data 10*: 2141-2194.

Lozada-Dávila JR (2010) Consideraciones metodológicas sobre los estudios de comunidades forestales. *Revista Forestal Venezolana 54*: 77-88.

Marroquín-Morales P, Méndez-González J, Jiménez-Pérez J, Aguirre-Calderón A, Yerena-Yamallel J (2018) Estimación de biomasa aérea en *Pinus cembroides* Zucc. y *Pinus halepensis* Mill. en Saltillo, Coahuila. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales 9*: 94-110.

Mendoza-Ponce A, Galicia L (2010) Aboveground and belowground biomass and carbon pools in high land temperate forest lands cape in Central Mexico. *Forestry 83*: 497-506.

Mostacedo B, Fredericksen TS (2000) *Manual de Métodos Básicos de Muestreo y Análisis en Ecología Vegetal*. Proyecto de Manejo Forestal Sostenible, Santa Cruz, Bolivia. 87 pp.

Návar-Cháidez JJ (2010) Los bosques templados del estado de Nuevo León: el manejo sustentable para bienes y servicios ambientales. *Madera y Bosques 16*: 51-69.

Pardos J (2010) *Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global*. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, Madrid, España. 253 pp.

Rodríguez R, Jiménez J, Aguirre OA, Treviño EJ (2006) Estimación del carbono almacenado en un bosque de niebla en Tamaulipas, México. *Ciencia UANL 9*: 179-188.

Rodríguez-Laguna R, Jiménez-Pérez J, Aguirre-Calderón OA, Treviño-Garza EJ, Razo-Zárate R (2009) Estimación de carbono almacenado en el bosque de pino-encino en la Reserva de la Biosfera el Cielo, Tamaulipas, México. *Ra Ximhai 5*: 317-327.

Vargas-Larreta B, López-Sánchez CA, Corral-Rivas JJ, López-Martínez JO, Aguirre-Calderón CG, Álvarez-González JG (2017) Allometric Equations for Estimating Biomass and Carbon Stocks in the Temperate Forests of North-Western Mexico. *Forests 8*: 1-20.

Yepes A, Sierra A, Niño L, López M, Garay C, Vargas D, Cabrera E, Barbosa A (2016) Biomasa y carbono total almacenado en robledales del sur de los Andes Colombianos: aportes para el enfoque REDD+ a escala de proyectos. *Revista de Biología Tropical 64*: 399-412.

Yerena JI, Jiménez J, Aguirre OA, Treviño EJ, Alanís E (2012) Concentración de carbono en el fuste de 21 especies de coníferas del noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales 3*: 49-56.