



DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i54.149>

Artículo

## Estructura de un ecosistema forestal y su relación con el contenido de carbono en el noreste de México

### Structure of a forest ecosystem and its relationship with the carbon stock in Northeastern Mexico

Enrique Buendía-Rodríguez<sup>1,2</sup>, Eduardo J. Treviño-Garza<sup>1\*</sup>, Eduardo, Alanís-Rodríguez<sup>1</sup>, Oscar A. Aguirre-Calderón<sup>1</sup>, Marco A. González-Tagle<sup>1</sup> y Marín Pompa-García<sup>3</sup>

#### Abstract

There is a positive relationship between the horizontal and vertical diversity of vegetation with the carbon stock (CS). The objective was to characterize a forest ecosystem and generate a model that describes the behavior of the CS in relation to the diversity of vegetation through diversity indexes. 10 sampling sites 2 500 m<sup>2</sup> were established. Basal area (*G*), Carbon stock (*CS*), and Shannon-Wiener (*H'*) and Pretzsch (*A*) indexes was calculated. Site 3 had the highest *G* with 49.01 ± 7.74 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>, and site 8 had a *G* of (22.67 ± 2.5 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>). Site 3 had the highest value *CS* (123.48 ± 17.19 Mg ha<sup>-1</sup>), site 8 had the lowest *CS* with 58.35 ± 5.75 Mg ha<sup>-1</sup>. Site 2 had the highest value *A* = 2.53, with *A*<sub>max</sub> = 3.5, and site 6 had the lowest values (*A* = 1.5 and *A*<sub>max</sub> = 2.48). Site 2 had the highest values *H'* = 1.78 and *H'*<sub>max</sub> = 2.40; site 8 had the lowest (*H'* = 0.83 and *H'*<sub>max</sub> = 1.10). Site 3 is characterized by northeast aspect and slope > 100 %, while sites 6 and 8 have northeast-east aspect and slopes of 20 to 40 %. The best regression model between the *CS* and *H'*, and for *A* was an exponential one with R<sup>2</sup> = 0.62 and R<sup>2</sup> = 0.59 (respectively). We conclude that there is a relation between the *CS* and the studied indexes.

**Key words:** Carbon stock, basal area, mixed forest, *Nuevo León*, Pretzsch index, Shannon-Wiener index.

#### Resumen

Existe una relación positiva entre el contenido de carbono (*CC*) y la diversidad horizontal y vertical de la vegetación. El objetivo fue caracterizar un ecosistema forestal y generar un modelo que describa el comportamiento del *CC* con la diversidad de la vegetación, a través de índices de diversidad. Se establecieron 10 sitios de muestreo de 2 500 m<sup>2</sup>, y se calculó la altura promedio, diámetro normal promedio (*d*<sub>1.30</sub>), área basal (*G*), contenido de carbono (*CC*) e índices de *Shannon-Wiener* (*H'*) y *Pretzsch* (*A*). El sitio 3 tuvo mayor *G*, con 49.01±7.74 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>; y el 8 la menor (22.67 ± 2.5 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>), a este último también le correspondió el más bajo de *CC*, con 58.35±5.75 Mg ha<sup>-1</sup>; mientras que, el 3 tuvo el valor más alto (123.48±17.19 Mg ha<sup>-1</sup>). En relación a los índices, el sitio 2 registró un *A*=2.53, con un *A*<sub>max</sub>=3.5, y el 6 tuvo valores inferiores (*A*=1.5 y *A*<sub>max</sub>=2.48); para el índice de *Shannon-Wiener* el mayor valor se presentó en el sitio 2: *H'*=1.78 y *H'*<sub>max</sub>=2.40, y el más bajo en el 8 (*H'*=0.83 y *H'*<sub>max</sub>=1.10). El sitio 3 se caracteriza por tener exposición noreste y pendiente >100 %, en tanto que en los sitios 6 y 8 es noreste-este y pendientes de 20 a 40 %. Los mejores modelos de regresión entre *CC* y *H'* y *A*, fueron de tipo exponencial, con un R<sup>2</sup>=0.62 y R<sup>2</sup>=0.59, respectivamente. Se concluye que sí existe una relación entre *CC* y los índices estudiados.

**Palabras clave:** Almacenes de carbono, área basal, bosques mixtos, *Nuevo León*, índice de *Pretzsch*, índice de *Shannon-Wiener*.

Fecha de recepción/Reception date: 12 de enero de 2018  
Fecha de aceptación/Acceptance date: 28 de junio de 2019

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

<sup>2</sup>Campo Experimental Valle de México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México.

<sup>3</sup>Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Juárez del Estado de Durango. México.

\*Autor por correspondencia; correo-e: eduardo.trevinogr@uanl.edu.mx

## Introducción

Por su alta fragilidad, la estructura es uno de los aspectos más relevantes en el ámbito forestal, lo que repercute en una fácil modificación de la misma. Usualmente, está referida a la forma en que los atributos de los árboles se distribuyen en los ecosistemas (Bettinger *et al.*, 2008; Gadow *et al.*, 2011). La importancia de la estructura biológica es su auto organización, la cual involucra a la regeneración, el crecimiento y a la mortalidad de los árboles; así como, a una variedad de interacciones entre individuos que, a su vez, afecta las propiedades del ecosistema (João y Carvalho, 2011; Gadow *et al.*, 2011). Estas incluyen la producción de biomasa, el almacenamiento de carbono, la diversidad vegetal, la captura de agua, entre otros; y la calidad de esos servicios ecosistémicos dependen, en mayor medida, del manejo que se realice para llegar a un fin determinado (Ruiqiang *et al.*, 2014). Por ello, es necesario realizar una caracterización correcta de la estructura de los ecosistemas que fundamente una toma de decisiones adecuada para la gestión de los recursos forestales (Jiménez *et al.*, 2001; Wehenkel *et al.*, 2011; Bannister y Donoso, 2013), con la finalidad de incrementar el contenido de carbono que un bosque puede almacenar, sin deteriorar la diversidad de la vegetación.

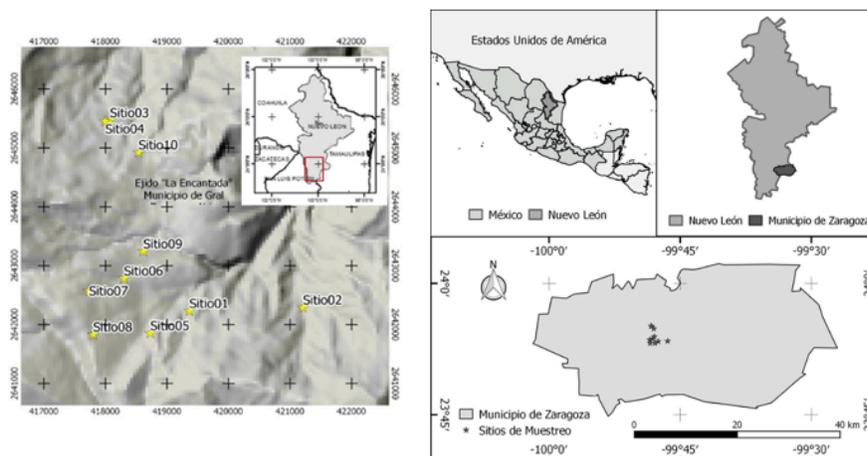
El manejo del bosque para la producción maderable no se contrapone con el dirigido para incrementar los almacenes de carbono y mucho menos, si al aumentar el carbono almacenado se incide en la pérdida de la diversidad del estrato arbóreo.

La caracterización de estos ecosistemas se puede realizar mediante el uso de índices que midan elementos de su diversidad, los cuales son indicadores de la calidad y cantidad de los recursos ecosistémicos (Magurran, 1988). Además, permiten comparar comunidades naturales o modificadas por efecto del manejo forestal (Halffter, 1998). Con lo anterior, es posible diseñar estrategias de conservación y de manejo sustentable a escala local (Moreno, 2001). Al respecto, la hipótesis planteada se refiere a que hay una relación entre la diversidad horizontal y vertical de la vegetación con el contenido de carbono, ya que al aumentar estas, se incrementan tanto la superficie, como los

estratos existentes en un bosque, lo que hace eficiente el almacén de carbono. Por tal motivo, el objetivo fue evaluar la estructura de un ecosistema forestal y generar un modelo que describa el comportamiento del contenido de carbono con relación a la diversidad de la vegetación, a través de índices de diversidad, en un bosque en el noreste de México; con la finalidad de tener una herramienta nueva para la adecuada toma de decisiones, con respecto al manejo forestal.

## Materiales y Métodos

El área de estudio se localiza en el sur del estado de Nuevo León, localizado geográficamente entre los 23°45′-25°32′ de latitud norte y 99°27′-100°25′ de longitud oeste (Figura 1). El clima es un semifrío subhúmedo con lluvias en verano [C(E)(w)], con temperatura media anual de 16 a 18 °C, precipitación media anual de 400 a 1 200 mm (García, 2004). La vegetación de la región corresponde a bosques conformados por asociaciones de pino-encino, encino-pino y pequeñas zonas con presencia de los géneros *Abies*, *Pseudotsuga* y *Picea* (Inegi, 2016).



**Figura 1.** Localización del área de estudio.

Se establecieron 10 sitios de muestreo de 2 500 m<sup>2</sup> cada uno (50 × 50 m), ubicados geográficamente con un GPS *Garmin*<sup>®</sup> 62 en diferentes condiciones fisiográficas (Cuadro 1), conforme a los parámetros utilizados en los sitios de investigación forestal y de suelo (Corral-Rivas *et al.*, 2009). Para medir la pendiente de los sitios se empleó un clinómetro electrónico (*Haglör*<sup>®</sup>); asimismo, se utilizó una brújula *Brunton*<sup>®</sup> para definir la orientación. En todos los sitios se midieron el diámetro normal ( $d_{1.30}$ ), con una cinta diamétrica *Forestry Suppliers Inc*<sup>®</sup>; la altura total ( $h$ ), con un hipsómetro *Vertez III*<sup>®</sup>, para cada uno de los árboles > 7.5 cm de diámetro normal. La evaluación de la similitud entre los sitios de muestreo se hizo en función de las características fisiográficas; para ello, se realizó un análisis de conglomerados (*cluster*) jerárquico, mediante la medida de distancia Bloque y el método de agrupación fue el de *Ward's* con su respectivo dendrograma de similaridad (IBM Corporation, 2013).

**Cuadro 1.** Características fisiográficas de los sitios de muestreo.

Sitio	UTM-X	UTM-Y	Altitud (msnm)	Exposición	Pendiente (%)
1	419 365	2 642 230	2 600-2 700	Noroeste	0-20
2	421 211	2 642 230	< 2 500	Norte	> 100
3	418 074	2 642 783	2 500-2 600	Norte	> 100
4	417 997	2 645 453	2 500-2 600	Noreste	0-20
5	418 729	2 641 853	2 700-2 800	Noroeste	0-20
6	418 301	2 642 783	2 700-2 800	Noreste	20-40
7	417 732	2 642 572	> 2 900	Este	20-40
8	417 801	2 641 831	> 2 900	Este	0-20
9	418 615	2 643 242	2 700-2 800	Este	20-40
10	418 540	2 644 924	2 600-2 700	Noreste	40-60

Para cada sitio se calculó la altura y el diámetro promedio, el área basal ( $G$ ), el contenido de carbono ( $CC$ ), y para cada una obtuvo la dispersión de datos por medio de la desviación estándar a nivel de sitio de muestreo. También se determinaron los índices de diversidad de especies horizontal (índice de *Shannon-Wiener*), el de *Pretzsch* para la diversidad vertical y el de valor de importancia (IVI).

El área basal se estimó como la suma por unidad de superficie de todos los fustes, a nivel del diámetro normal (Ecuación 1).

$$G = \sum_1^n \frac{\pi}{4} * d^2 \quad (1)$$

Donde:

$G$  = Área basal

$d$  = Diámetro normal

$\pi$  = Constante (3.1416)

$n$  = Número de árboles presentes dentro del sitio de muestreo

La cuantificación de carbono almacenado se realizó con las ecuaciones alométricas de las especies más importantes, generadas previamente por diferentes autores; para aquéllas que no se tuvieron expresiones específicas en la región de estudio, se usaron las desarrolladas en otras zonas de clima templado-frío del país para el taxón de interés (Cuadro 2).



**Cuadro 2.** Ecuaciones alométricas por especie.

<b>Especie</b>	<b>Ecuación</b>	<b>Autor</b>
<i>Picea martinezii</i> T. F. Patterson	$V = 0.00239 * D^2 * H + 0.06439$	Zianis <i>et al.</i> (2005)
<i>Abies vejarii</i> Martínez	$CC = 0.035 * D^{2.513}$	Avendaño <i>et al.</i> (2009)
<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco	$BA = 0.1354 * D^{2.3033}$	Návar (2009)
<i>Cupressus arizonica</i> Greene	$CC = 0.2637 * D^{1.7698}$	Vigil (2010)
<i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenb. ex Schltldl.	$BA = 0.2893 * D^{2.1569}$	Návar (2009)
<i>Pinus teocote</i> Schiede ex Schltldl et Cham.	$BA = 0.40196 * D^2$	Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez (2011)
<i>Pinus pseudostrabus</i> Lindl.	$BA = 0.35179 * D^2$	Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez (2011)
<i>Taxus globosa</i> Schltldl	$V = (3.1416 * R^2 * H)/3$	Volumen de un cono
<i>Quercus</i> spp	$CC = 0.0192 * D^{2.7569}$	Tomás (2013)
Otras hojosas	$V = 0.00009001 * D^{2.38434} * H^{0.16699}$	Probosque (1990)

$V$  = Volumen ( $m^3 ha^{-1}$ );  $BA$  = Biomasa aérea ( $Mg ha^{-1}$ );  $CC$  = Carbono capturado ( $Mg ha^{-1}$ );  $D$  = Diámetro Altura de Pecho (m);  $H$  = Altura total (m);  $R$  = Radio ( $D/2$ ).

La mitad de las especies arbóreas tuvieron ecuaciones alométricas para obtener el  $CC$ ; para las restantes se aplicaron las usadas para estimar biomasa multiplicada por un factor (0.50) (IPCC, 2016). En el caso de *Picea martinezii* T. F. Patterson, *Taxus globosa* Schltldl. y las hojosas solo se tienen ecuaciones de volumen; por ello, se multiplicó por el factor 0.50 para obtener la biomasa aproximada (Silva-Arredondo y Návar-Cháidez, 2009). Los encinos y otras latifoliadas se agruparon para emplear una sola ecuación. Tanto para el área basal, como para el contenido de carbono se realizaron los cálculos por sitio de muestreo y después se efectuó la extrapolación a una hectárea, esto para hacer inferencias y comparaciones con otros estudios.

El índice de valor de importancia (IVI) es un índice sintético estructural, desarrollado principalmente para jerarquizar la dominancia de cada especie en rodales mezclados;

se estimó sumando la abundancia relativa, la densidad relativa y la frecuencia relativa (Curtis y McIntosh, 1951) (Ecuación 2):

$$IVI = \frac{(A_{rel} + D_{rel} + F_{rel})}{3} \quad (2)$$

Donde:

$A_{rel}$  = Abundancia relativa

$D_{rel}$  = Densidad relativa

$F_{rel}$  = Frecuencia relativa.

Para la estimación de la abundancia relativa se utilizaron las ecuaciones 3 y 4:

$$A_i = \frac{N_i}{S} \quad (3)$$

$$A_{rel} = \left( \frac{A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \right) * 100 \quad (4)$$

Donde:

$A_i$  = Abundancia absoluta

$N_i$  = Número de individuos de la especie  $i$

$S$  = Superficie de muestreo (ha)

$A_{rel}$  = Abundancia relativa de la especie  $i$  respecto a la abundancia total

La dominancia se evaluó con las ecuaciones 5 y 6:

$$D_i = \frac{Ab_i}{S} \quad (5)$$

$$D_{rel} = \left( \frac{D_i}{\sum_{i=1}^n D_i} \right) * 100 \quad (6)$$

Donde:

$D_i$  = Dominancia absoluta

$Ab_i$  = Área basal de la especie  $i$

$S$  = Superficie muestreada (ha).

$D_{rel}$  = Dominancia relativa de la especie  $i$  respecto a la dominancia total

La frecuencia relativa se estimó con las ecuaciones 7 y 8:

$$F_i = \frac{f_i}{N*S} \quad (7)$$

$$F_{rel} = \left( \frac{F_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \right) * 100 \quad (8)$$

Donde

$F_i$  = Frecuencia absoluta (porcentaje de presencia en los sitios de muestreo)

$f_i$  = Número de sitios en los que está presente la especie  $i$

$S$  = Superficie muestreada (ha)

$N$  = Número de sitios de muestreo

$F_{rel}$  = Frecuencia relativa de la especie  $i$  respecto a la frecuencia total

El índice de diversidad horizontal de especies se define como el número de taxones en una unidad de área, tiene dos componentes principales: la riqueza (número de especies) y la equitatividad (número de individuos de una sola especie). Uno de los más usados es el Índice de *Shannon-Wiener* ( $H'$ ) (Shannon y Weaver, 1949) (Ecuación 9):

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i * \ln(P_i) \quad (9)$$

Donde:

$S$  = Número de especies presentes

$P_i$  = Proporción de las especies

$p_i = n_i/N$

$n_i$  = Número de individuos de la especie  $i$

$N$  = número total de individuos

La distribución vertical de las especies se calculó mediante el Índice de *Pretzsch* ( $A$ ) (Pretzsch, 2009), el cual usa diferentes intervalos de altura para la detección de cambios en la diversidad en los distintos estratos del bosque (Ecuación 10).

$$A = - \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^Z p_{ij} * \ln(p_{ij}) \quad (10)$$

Donde:

$S$  = Número de especies presentes

$Z$  = Número de estratos de altura

$p_{ij}$  = Porcentaje de especies en cada zona

$p_{ij} = n_{ij}/N$

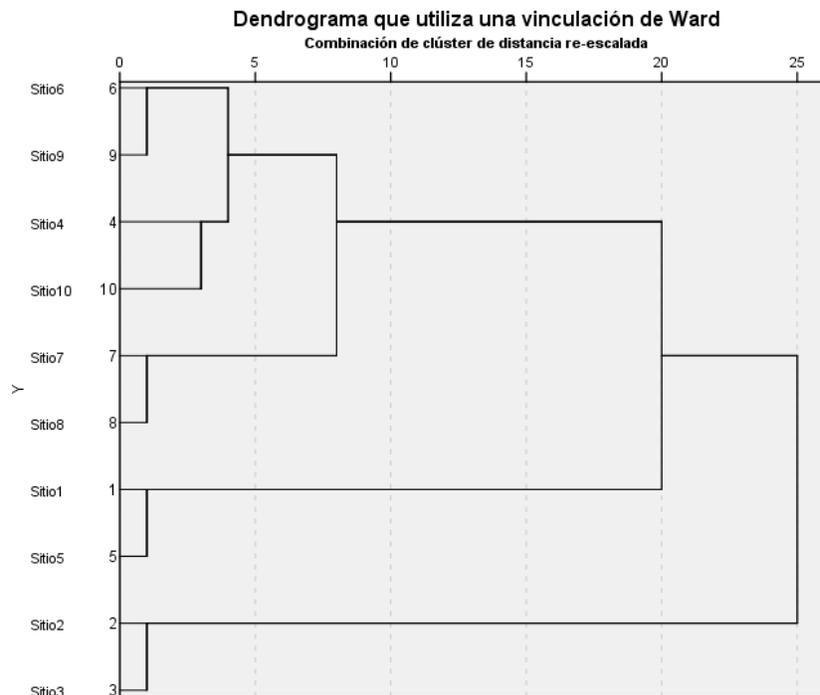
$n_{ij}$  = Número de individuos de la especie  $i$  en el estrato  $j$

$N$  = Número total de individuos

Posteriormente, se generó un modelo estadístico que describe la relación entre ellos. Los análisis se hicieron con el paquete estadístico SPSS<sup>®</sup> ver. 22.0 (IBM Corporation, 2013). Se aplicó un análisis de varianza de un factor y se realizó una comparación de medias mediante la prueba de *Tukey* para determinar la existencia de diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) (Zar, 2010).

## Resultados y Discusión

Con base en el dendrograma de similitud, se observaron cinco grupos (Figura 2); los más diferentes (superior a 80 %) fueron los sitios 2 y 3, 1 y 5. El primer grupo se caracterizó por presentar una exposición norte, con pendientes por arriba de 100 %, un intervalo altitudinal de 2 500 a 2 600 m; al segundo grupo le correspondió una exposición noreste y pendientes de 0 a 20 %, con una altitud de 2 600 a 2 800 m.



**Figura 2.** Dendrograma de similitud.

Un tercer grupo se integró con los sitios con mayor similitud (menores a 30 %), los cuales tuvieron exposición hacia el este, con una altitud superior a 2 900 m y una pendiente de 0 a 40 %; aunque fueron discriminados los sitios 7 y 8.

Los sitios 6 y 9 conformaron el cuarto grupo, que se ubicó en un gradiente altitudinal de 2 700 a 2 900 m, con una pendiente de 20 a 40 %. Por último, un quinto agrupamiento, se conformó con los sitios 4 y 10, cuya exposición fue hacia el noreste y su altura varió de 2 500 a 2 700 msnm.

Respecto al Índice de Valor de Importancia (IVI), el mayor peso específico fue para los géneros *Pinus* (sitios 5, 6, 7, 8, 9), *Quercus* (sitios 4, 10), *Picea* (sitio 1), *Abies* (sitio 2) y *Cupressus* (sitio 3). Los taxones con más importancia en la mayoría de los sitios muestreados fueron: *Pinus teocote* Schiede ex Schldl. et Cham. (sitios del 6 al 10) y *Quercus cordifolia* Trel. (8, 9 y 10) (Cuadro 3). Este comportamiento de la vegetación se debe a que son bosques mezclados de pino-encino.



**Cuadro 3.** Relación de especies por sitio de muestreo y su valor de IVI.

Especie	Sitio									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Abies vejarii</i> Martínez	16.81	33.04	32.31	6.24		1.80				
<i>Arbutus xalapensis</i> HBK.		1.06		7.60	4.50	11.14	12.22	6.24	7.53	4.73
<i>Carpinus caroliniana</i> Walter		1.08								
<i>Cupressus arizonica</i> Greene			34.17	0.71						
<i>Picea martinezii</i> T. F. Patterson	29.06	8.53								
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.			1.52		14.13				4.12	11.46
<i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenb. ex Schltld.	12.67	2.15	12.07	1.07	37.60				4.21	12.94
<i>Pinus teocote</i> Schiede ex Schltld et Cham.				5.05	2.77	54.01	44.23	50.35	42.30	16.36
<i>Populus tremuloides</i> Michx.				3.45						
<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco	9.83	1.61	9.10	1.74						4.14
<i>Quercus affinis</i> Scheidw.	18.63	19.24	9.32	62.81	10.03					
<i>Quercus cordifolia</i> Trel.								43.41	41.85	50.36
<i>Quercus germana</i> Schltld. & Cham.				8.92						
<i>Quercus greggii</i> Trel.					7.08					
<i>Quercus laeta</i> Liebm.				2.42			20.99			
<i>Quercus mexicana</i> Humb. & Bonpl.		15.68								
<i>Quercus polymorpha</i> Cham. & Schltld.		6.96								
<i>Quercus sideroxyla</i> Humb. & Bonpl.					23.90	33.06	22.55			
<i>Taxus globosa</i> Schltld.	13.01	9.58	1.50							
<i>Ulmus crassifolia</i> Nutt.		1.07								

En el sitio 2 se registró la cantidad más alta de especies, con 11, seguido del 4, con 10; ambos presentan exposiciones norte-noreste y un intervalo altitudinal de 2 500 a 2 700 m. El sitio con menos taxones fue el 8, en el que solo se identificaron tres y que se caracteriza por tener una exposición este y altitud superior a 2 900 m; los sitios 6 y 7 tuvieron cuatro especies; en los sitios restantes el número de taxa varió entre cinco y siete por sitio (Cuadro 3). Dicho comportamiento evidencia que a mayor altitud disminuye el número de especies por sitio (menor diversidad). En todos los sitios, al menos, hubo un taxon del género *Pinus* y uno de *Quercus*. *Arbutus xalapensis* se observó en ocho sitios; *Pinus teocote* (cuatro de ellos con el mayor valor de IVI) y *P. ayacahuite* en siete sitios. Las especies con menos presencia (una por

sitio) fueron: *Quercus germana*, *Q. greggii*, *Q. mexicana*, *Q. polymorpha*, *Carpinus caroliniana* y *Ulmus* sp.

La mayoría de las alturas promedio fluctuaron entre 11.2 y 14.2 m, excepto en los sitios 1 y 3, cuyos valores fueron de 16.9 a 20.5 m; estos últimos conformaron rodales frondosos, dominados por *Cupresus arizonica* y *Picea martinezii* en ubicaciones con exposición norte-noreste. Los diámetros promedio más altos (35.9 y 32.4 cm) se obtuvieron en los sitios 3 y 9, en los cuales dominan *Cupressus arizonica* y *Pinus teocote*, respectivamente; mientras que, al sitio 4 le correspondió el menor diámetro promedio, con 18.1 cm, la especie dominante fue *Quercus affinis*; su exposición es noreste, con una altitud menor a 2 700 m.

El área basal presentó diferencias significativas entre los 10 sitios ( $p=0.109$ ); el 3 tuvo el valor más alto, con  $49.01 \pm 7.74 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$  y mayor presencia de *Cupressus arizonica*; y el menor fue para el sitio 8, con  $22.67 \pm 2.5 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ , integrado en su mayoría por *Pinus teocote*, con exposición este y una altitud  $>2\ 900$  m. Estas cifras son similares a las citadas por Encinas-Domínguez *et al.* (2008) para un bosque de oyamel en Coahuila ( $29.69 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ ), pero menores a los documentados por Aguirre *et al.* (2003) para bosques mixtos en el noreste del país ( $35.9$  a  $48.2 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ ), aunque estos coinciden con los del sitio 3 (Cuadro 4).



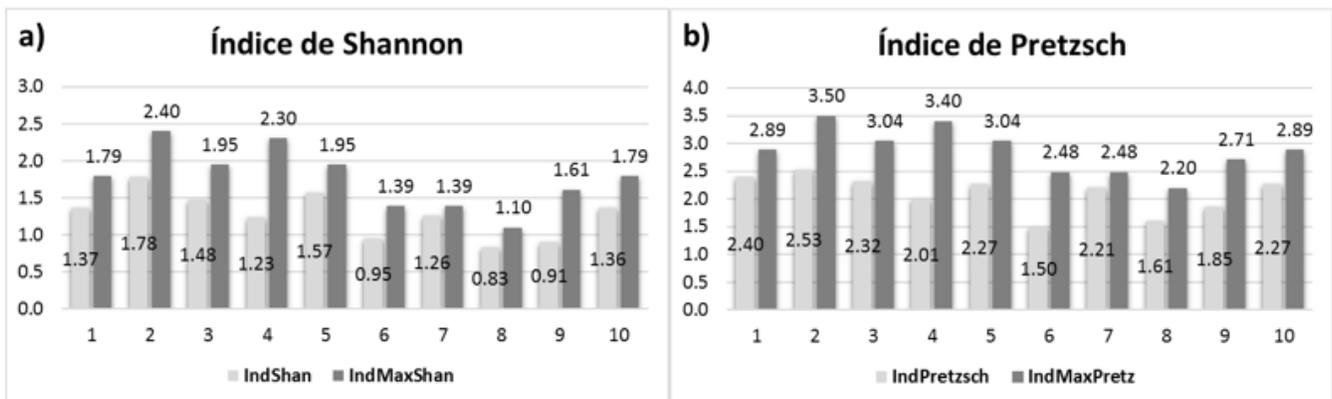
**Cuadro 4.** Variables estructurales por sitio.

Sitio	Altura promedio (m)	Diámetro promedio (cm)	G (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	CC (Mg ha <sup>-1</sup> )	Índice de Pretzsch	Índice de Shannon
1	16.96 ± 0.82 a	23.94 ± 0.87 a	23.20 ± 7.28 a	83.90 ± 24.00a	2.40	1.37
2	14.21 ± 0.68 a,b	21.29 ± 1.70 a,b	29.94 ± 9.29 a	111.23 ± 37.25a	2.53	1.78
3	20.57 ± 0.81 c	35.96 ± 2.00 c	49.01 ± 7.74 a	123.49 ± 17.19a	2.32	1.48
4	12.43 ± 0.44 b	18.10 ± 0.47 b	31.89 ± 2.03 a	71.31 ± 5.10a	2.01	1.23
5	13.02 ± 0.33 b	24.27 ± 1.22 a,d	33.44 ± 4.49 a	94.70 ± 14.06a	2.27	1.57
6	13.92 ± 0.59 a,b	29.53 ± 1.04 d,e	27.01 ± 6.57 a	71.73 ± 18.83a	1.50	0.95
7	12.10 ± 0.75 b	24.61 ± 0.70 a,d	33.22 ± 1.55 a	91.81 ± 3.09a	2.21	1.26
8	13.00 ± 0.96 b	25.86 ± 1.17 a,d	22.67 ± 2.50 a	58.36 ± 5.75a	1.61	0.83
9	13.42 ± 0.57 b	32.45 ± 0.42 c,e	28.68 ± 2.23 a	82.95 ± 10.39a	1.85	0.91
10	11.28 ± 0.42 b	21.50 ± 0.89 a,b	28.70 ± 4.85 a	81.46 ± 14.81a	2.27	1.36

G = Área basal; CC = Contenido de carbono. Medias seguidas de diferentes letras (a, b, c, d, e) indican niveles diferentes de significancia para  $p < 0.05$ .

El carbono promedio en los 10 sitios presentó diferencias ( $p=0.354$ ). En el sitio 3 se estimó la mayor cantidad de carbono capturado, con  $123.48 \pm 17.19$  Mg ha<sup>-1</sup>; seguido del 2, con  $111.22 \pm 37.26$  Mg ha<sup>-1</sup>; las especies representativas fueron *Cupressus arizonica* y *Abies vejarii*, respectivamente, además registraron el IVI más alto por sitio; se ubicaron en exposiciones norte, con pendientes superiores a 100 %. Autores como, Razo-Zárate *et al.* (2013) consignan valores de 62.6 Mg ha<sup>-1</sup> y 166.6 Mg ha<sup>-1</sup> para bosques similares, tanto conservados como perturbados, respectivamente. El sitio 8 tuvo el CC más bajo con  $58.35 \pm 5.75$  Mg ha<sup>-1</sup>, en el que dominó *Pinus teocote*, además registró el menor valor de área basal, se desarrollan en altitudes que superan los 2 900 msnm, con exposición este, y constituyen rodales con arbolado de dimensiones medianas, en comparación con los sitios 3 y 2 (Cuadro 4).

El índice de *Shannon-Wiener* en el sitio 2 fue de  $H'=1.78$  y  $H'_{max}=2.4$ , que se consideran altos, con 11 especies, lo cual evidencia una gran diversidad; asimismo, resultó con el segundo mayor valor de contenido de carbono almacenado. En tanto que, los valores más bajos fueron para el sitio 8, con  $H'=0.83$  y  $H'_{max}=1.1$  (Figura 3a), con solo tres especies, pero los valores entre  $H'$  y  $H'_{max}$  son similares, lo que corresponde a una distribución homogénea. Los resultados anteriores son superiores a los señalados por Santibañez-Andrade *et al.* (2015) en un bosque de pino del Valle de México ( $H'=1.02-1.28$ ); mientras que, López-Hernández *et al.* (2017) indican valores de  $H'=1.37$ , en bosques templados bajo manejo forestal, cifras similares a los valores de los sitios 1, 3, 4, 7 y 10.



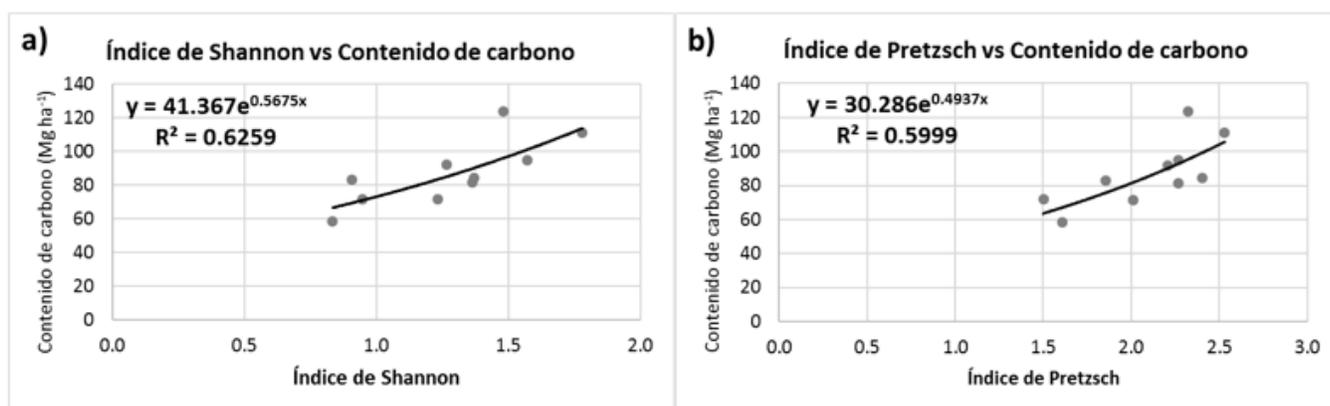
**Figura 3.** Gráficas de índice de diversidad y su máximo por sitio; a) índice horizontal (*Shannon-Wiener*), y b) índice vertical (*Pretzsch*).

Para la estructura vertical se calcularon los valores del índice  $A$  (*Pretzsch*), que representa la diversidad de especies por estrato vertical. El sitio 2 presentó el mayor valor de  $A=2.53$  y  $A_{max}=3.5$ ; por lo que se considera un rodal no uniforme, respecto a las alturas. También tuvo los registros más altos en diversidad horizontal (índice  $H$ ); por lo tanto, es un rodal con amplia diversidad tanto vertical, como horizontal con valores dasométricos altos (altura promedio, diámetro promedio, área basal y

contenido de carbono), debido, principalmente, a su condición fisiográfica que corresponde a una altitud inferior a 2 500 m, la cual es menor a la del resto de los sitios estudiados. Para el sitio 6 se estimó el valor más bajo ( $A=1.5$  y  $A_{max}=2.48$ ) (Figura 3b), aunque muy similar al sitio 8 ( $A=1.61$  y  $A_{max}=2.20$ ), esto representó una uniformidad media que corresponde a las condiciones más pobres del bosque, en cuanto a diversidad arbórea, debido, sobre todo, a sus condiciones fisiográficas (pendiente de 20 a 40 % y altitud de 2 700 a 2 900 m).

Los valores altos en el índice de *Pretzsch* sugieren una gran diversidad de especies en la estructura vertical, como ocurrió en el sitio 2 con 10 especies, pero sin distribución uniforme en todos los estratos. Los valores del sitio 7, cuyos  $A$  y  $A_{max}$  son muy similares, reflejan una distribución homogénea de los taxones en los tres estratos. Estos resultados coinciden con los consignados por Rubio *et al.* (2014), con  $A_{max}=3.74$  y  $A=2.01$  en bosques mixtos; pero son altos en comparación con los de Villavicencio *et al.* (2006), quienes obtuvieron:  $A=2$  y  $A_{max}=2.7$  para un bosque de pino-encino, donde el encino dominó en los tres estratos.

Para describir la relación del contenido de carbono con los índices de diversidad horizontal y vertical, se generaron varios modelos de regresión. En el caso del índice de *Shannon-Wiener*, el mejor modelo fue uno exponencial ( $y=41.367e^{0.5675x}$ ), con un  $R^2=0.62$  (Figura 4a); para el índice de *Pretzsch*, también fue un modelo exponencial ( $y=30.286e^{0.4937x}$ ), con un  $R^2=0.59$  (Figura 4b). Ambos presentaron  $R^2$  bajos, pero se observó una tendencia entre las variables estudiadas (Figura 4) en las que, a mayor valor en los índices de diversidad, el contenido de carbono aumenta. Estas relaciones positivas se deben a que existe una distribución homogénea de las especies arbóreas dentro de los sitios de estudio; además, se distribuyen en los tres estratos verticales evaluados cubriendo mayor cantidad de superficie tanto vertical, como horizontal.



a) Índice horizontal (*Shannon-Wiener*) y b) Índice vertical (*Pretzsch*)

**Figura 4.** Modelos de regresión entre contenido de carbono e índice de diversidad.

## Conclusiones

Se concluye que sí existen variaciones de composición y estructura dentro del ecosistema estudiado, el cual está compuesto, principalmente, por asociaciones de pino-encino. En general, está constituido por individuos de porte mediano (11 a 14 m de altura) y diámetros de 20-30 cm.

Se demostró que existe una relación entre carbono capturado y los índices de diversidad horizontal de *Shannon-Wiener* ( $H'$ ) y el índice de diversidad vertical de *Pretzsch* ( $A$ ). Los modelos generados, aunque tienen una  $R^2$  baja (0.59 para  $H'$  y 0.62 para  $A$ ), sí reflejan la relación entre el contenido de carbono y la diversidad de especies arbóreas, tanto horizontal como vertical y evidencian que a medida que el valor de los índices aumenta, el CC se incrementa; por lo tanto, una las estrategias a seguir en los planes de manejo sería tener especies distribuidas uniformemente en toda el área y en los diferentes estratos verticales.

## **Agradecimientos**

A la Facultad de Ciencias Forestales de la UANL, por las facilidades otorgadas para el desarrollo del trabajo de campo.

## **Conflicto de intereses**

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

## **Contribución por autor**

Enrique Buendía-Rodríguez: diseño y estructura del manuscrito, análisis de datos, y redacción del manuscrito; Eduardo J. Treviño-Garza: toma de datos de campo, captura de datos, análisis estadístico; Eduardo Alanís-Rodríguez: coordinación de trabajo de campo, toma de datos de campo, revisión del documento; Oscar A. Aguirre-Calderón: análisis de información, revisión del documento; Marco A. González-Tagle: toma de datos de campo, revisión del documento; Marín Pompa-García: análisis de información, redacción y revisión del documento.

## **Referencias**

Aguirre-Calderón, Ó. A. y J. Jiménez-Pérez. 2011. Evaluación del contenido de carbono en bosques del sur de Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(6): 73–83.

Aguirre C., Ó. A., J. Pérez J., H. Kramer y A. Akça. 2003. Análisis estructural de ecosistemas forestales en Cerro del Potosí, Nuevo León, México. *Ciencia UANL* 6(2): 219–225.

Avendaño H., D. M., M. Acosta M., F. Carrillo A. y J. D. Etchevers B. 2009. Estimación de la biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Revista Fitotecnia Mexicana* 32(3): 233–238.

- Bannister, J. R. and P. J. Donoso. 2013. Forest Typification to Characterize the Structure and Composition of Old-growth Evergreen Forests on Chiloé Island, North Patagonia (Chile). *Forests* 4(4): 1087–1105. <https://doi.org/10.3390/f4041087>.
- Bettinger, P., K. Boston, J. Siry and D. Grebner. 2008. *Forest Management and Planning*. Academic Press-Elsevier. San Diego, CA USA. 360 p.
- Corral-Rivas, J. J., B. Vargas-Larreta, C. Wehenkel, Ó. A. Aguirre-Calderón, J. G. Álvarez-González y A. Rojo-Alboreca. 2009. *Guía para el Establecimiento de Sitios de Investigación Forestal y de Suelos en Bosques del Estado de Durango*. Editorial UJED. El Salto, Durango, México. 81 p.
- Curtis, J. T. and R. P. McIntosh. 1951. An Upland Forest Continuum in the Prairie-Forest Border Region of Wisconsin. *Ecology* 32(3): 476–496.
- Encinas-Domínguez, J. A., F. J. Encina-Domínguez, E. Mata-Rocha and J. Valdes-Reyna. 2008. Aspectos estructurales, composición florística y caracterización ecológica del bosque de oyamel de la sierra de Zapalinamé, Coahuila, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 83: 13–24.
- Gadow, K., v., S. Sánchez O. y J. G. Álvarez G. 2007. *Estructura y Crecimiento del Bosque*. <https://www.researchgate.net/publication/265270198>. Favor de dar VoBo y colocar la fecha de consulta (10 de agosto de 2017).
- Gadow, K. v., C. Yu Zhang, C. Wehenkel, A. Pommerening, J. Corral-Rivas, M. Korol and X. H. Zhao. 2011. Forest Structure and Diversity. *In: Pukkala, T, K. V. Gadow, J. Finland and M. Tomé (eds.). Continuous Cover Forestry. Series Managing Forest Ecosystems. Vol. 24.* Springer. Heidelberg, Germany. pp. 29-83.
- García, E. 2004. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen México 5ª edición*. Instituto de Geografía-UNAM. México, D.F., México. 90 p.

Halffter, G. 1998. A strategy for measuring landscape biodiversity. *Biology International* 36: 3–17.

IBM Corporation. 2013. IBM SPSS Statistics 22 Brief Guide.

[http://www.sussex.ac.uk/its/pdfs/SPSS\\_Brief\\_Guide\\_22.pdf](http://www.sussex.ac.uk/its/pdfs/SPSS_Brief_Guide_22.pdf) (23 de diciembre de 2016).

Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI). 2016. Anuario Estadístico del Estado de Nuevo León. México: INEGI.

[http://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF\\_Docs/NL\\_ANUARIO\\_PDF16.pdf](http://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/NL_ANUARIO_PDF16.pdf)  
(19 de julio de 2017).

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 1996. Report of the twelfth session of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Reference manual and work book of the IPCC 1996 revised guidelines for national greenhouse gas inventories. 11-13 September. Mexico City, Mexico. 73 p.

Jiménez, J., O. Aguirre and H. Kramer. 2001. Análisis de la estructura horizontal y vertical en un ecosistema multicohortal de pino-encino en el norte de México. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales* 10(2): 355–366.

João, P. and F. Carvalho. 2011. Composition and structure of natural mixed-oak stands in northern and central Portugal. *Forest Ecology and Management* 262: 1928–1937.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.04.020>.

López-Hernández, J. A., Ó A. Aguirre-Calderón, E. Alanís-Rodríguez, J. C. Monarrez-González, M. A. González-Tagle and J. Jiménez-Pérez. 2017. Composición y diversidad de especies forestales en bosques templados de Puebla, México. *Madera y Bosques* 23: 39–51.

<https://doi.org/10.21829/myb.2017.2311518>.

Magurran, A. E. 1988. *Ecological Diversity and Its Measurement*. Princeton University Press. Princeton, NJ, USA. 179 p.

- Moreno, C. E. 2001. Métodos para medir la biodiversidad. Vol. 1. M&T-Manuales y Tesis SEA. Zaragoza, España. 84 p.
- Návar, J. 2009. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management* 257: 427–434.  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.09.028>.
- Pretzsch, H. 2009. *Forest Dynamics, Growth and Yield. From Measurement to Model*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Berlin, Germany. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88307-4>.
- PROBOSQUE. 1990. Segundo estudio dasonómico del Estado de México. SEDEMEX. Toluca, Edo. de Méx., México. 334 p.
- Razo-Zárate, R., A. J. Gordillo-Martínez, R. Rodríguez-Laguna, C. C. Maycotte-Morales and O. A. Acevedo-Sandoval. 2013. Escenarios de carbono para el bosque de oyamel del Parque Nacional El Chico, Hidalgo, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 9(1):17–21.
- Rubio C., E. A., M. A. González T., J. Jiménez P., E. Alanís R. y D. Y. Flores Á. 2014. Diversidad y distribución vertical de especies vegetales mediante el índice de Pretzsch. *Ciencia UANL* 65: 34–41.
- Ruiqiang, N., Y. Baiketuerhan, C. Zhang, X. Zhao and K. v. Gadow. 2014. Analysing structural diversity in two temperate forest in northeastern China. *Forest Ecology and Management* 316: 139–147. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2013.10.012>.
- Santibañez-Andrade, G., S. Castillo-Argüero y Y. Martínez-Orea. 2015. Evaluación del estado de conservación de la vegetación de los bosques de una cuenca heterogénea del Valle de México. *Bosque* 36(2): 299–313. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002015000200015>
- Shannon, C. E. and W. Weaver. 1949. *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press Urban and Chicago. Chicago, IL, USA. 663 p.

Silva-Arredondo, F. M. y J. de J. Návar-Cháidez. 2009. Estimación de factores de expansión de carbono en comunidades forestales templadas del norte de Durango, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15(2):155-160.

Tomás M., C. E. 2013. Estimación de biomasa y carbono mediante ecuaciones alométricas en *Quercus laurina* Humb. y *Quercus rugosa* Née en predios bajo manejo del ejido San Pablo Ixayoc, Estado de México. Tesis ingeniero forestal. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Edo. de Méx., México. 54 p.

Vigil N., N. 2010. Estimación de biomasa y contenido de carbono en *Cupressus lindleyi* *Klotzsch ex Endl.* en el campo forestal experimental Las Cruces, Texcoco, México. Tesis ingeniero forestal. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Edo. de Méx., México. 61 p.

Villavicencio G., R., P. Bauche P., A. Gallegos R., A. L. Santiago P. y F. M. Huerta M. 2006. Caracterización estructural y diversidad de comunidades arbóreas de La Sierra de Quila Departamento. *Boletín IBUG* 13(1): 67–76.

Wehenkel, C., J. J Corral-Rivas, J. C. Hernández-Díaz and K. v. Gadow. 2011. Estimating balanced structure areas in multi-species forests on the Sierra Madre Occidental , Mexico. *Annals of Forest Science* 68: 385–394. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0027-9>.

Zar, J. H. 2010. *Biostatistical analysis*. 5<sup>th</sup> ed. Prentice Hall. Englewood Cliffs, NJ, USA. 663 p.

Zianis, D., P. Muukkonen, R. Mäkipää and M. Mencuccini. 2005. Biomass and Stem Volume Equations for Tree Species in Europe. *Silva Fennica. Monographs* 4. Tammer-Paino. Tampere, Finland. 63 p.



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.