

Variables dasométricas que determinan la carga de combustible en bosques de encino en Guerrero, México

Dasometric variables that determine fuel load in oak forests in Guerrero, Mexico

Bernardo López-López^{1*} , Óscar Alberto Aguirre-Calderón¹ , Javier Jiménez-Pérez¹ , Marco Aurelio González-Tagle¹ , Eduardo Alanís-Rodríguez¹ , Jorge Méndez-González² 

¹Facultad de Ciencias Forestales-Universidad Autónoma de Nuevo León, Carretera Nacional km 145. CP. 67700. Linares, Nuevo León, México.

²Departamento Forestal-Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro 1923. CP. 25315. Buenavista, Saltillo, Coahuila, Mexico.

*Autor de correspondencia: lopez_020986@hotmail.com

Artículo científico

Recibido: 30 de noviembre 2023

Aceptado: 09 de abril 2024

RESUMEN. El cambio climático y la falta de manejo a los combustibles en los bosques de encino propicia condiciones favorables para la ocurrencia de incendios forestales. El objetivo de la presente investigación fue conocer la relación de variables dasométricas, pendiente del terreno (Pe), profundidad de la hojarasca (Ph) y profundidad del mantillo (Pm) sobre la carga de combustible en bosques de encino en la región Montaña de Guerrero. Las variables dasométricas diámetro medio (Dm), altura media (Am), número de árboles ha⁻¹ (Na) y Área basal ha⁻¹ (Ab) se evaluaron de acuerdo al diseño de muestreo del Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2015; en cada sitio de muestreo se establecieron tres líneas de intersección planar para el muestreo de material leñoso (MI), se recogió la hojarasca (Ho) y mantillo (Ma) en 0.09 m². La carga total de combustibles osciló de 23.2 a 46.5 t ha⁻¹ ($p < 0.05$), el Ma presentó mayor carga con el 43 %, seguido el material leñoso (MI) y hojarasca (Ho) con el 31 y 26 %. La carga total (Ct) mostró relación con el Ma, Ho y MI ($r = 0.81$ a 0.41), la Ho con Ph y Pe ($r = 0.71$ y -0.72). El c1h mostró relación con el Na, Ma, Pe y Dm ($r = 0.72$ a -0.41), el c10h evidenció correlación con el Ab, Pe y Na ($r = 0.51$ a 0.42). Las variables dasométricas solo explican la carga de combustible con diámetro menor o igual a 2.5 cm.

Palabras clave: Área basal, pendiente, diámetro medio, altura media, material leñoso.

ABSTRACT. Climate change and the lack of fuel management in oak forests promote favorable conditions for the occurrence of forest fires. The objective of the present research was to know the relationship of dasometric variables, terrain slope (Pe), depth of leaf litter (Ph) and depth of mulch (Pm) on the fuel load in oak forests in the Mountain region of Guerrero. The dasometric variables mean diameter (Dm), mean height (Am), number of trees ha⁻¹ (Na) and basal area ha⁻¹ (Ab) were evaluated according to the sampling design of the 2015 National Forest and Soil Inventory; At each sampling site, three planar intersection lines were established for sampling woody material (MI), leaf litter (Ho) and mulch (Ma) were collected in 0.09 m². The total fuel load ranged from 23.2 to 46.5 t ha⁻¹ ($p < 0.05$), the Ma presented the highest load with 43%, followed by woody material (MI) and leaf litter (Ho) with 31 and 26%. The total charge (Ct) showed a relationship with Ma, Ho and MI ($r = 0.81$ to 0.41), Ho with Ph and Pe ($r = 0.71$ and -0.72). The c1h showed a relationship with Na, Ma, Pe and Dm ($r = 0.72$ to -0.41), the c10h showed a correlation with Ab, Pe and Na ($r = 0.51$ to 0.42). The dasometric variables only explain the fuel load with a diameter less than or equal to 2.5 cm.

Keywords: Basal area, slope, average diameter, average height, woody material.

Como citar: López-López B, Aguirre-Calderón OA, Jiménez-Pérez J, González-Tagle MA, Alanís-Rodríguez E, Méndez-González J (2024) Variables dasométricas que determinan la carga de combustible en bosques de encino en Guerrero, México. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 11(2): e3957. DOI: 10.19136/era.a11n2.3957.

INTRODUCCIÓN

En México los bosques de encino están adaptados al fuego, sin embargo, en las regiones tropicales y subtropicales del país también hay especies sensibles a dicho elemento (Rodríguez-Trejo y Myers 2010). La alteración del régimen de fuego en los ecosistemas tropicales representa alrededor de la mitad de la superficie afectada por incendios en el mundo (Cochrane 2009).

La frecuencia e intensidad de los incendios forestales están determinados por el clima, la topografía y la acumulación del material combustible (Valdés *et al.* 2016). La carga de combustibles es el único factor que puede ser controlado por el ser humano de los tres componentes del triángulo del fuego (Gould *et al.* 2008), por ello conocer la carga de dicho componente permitirá generar alternativas para la prevención de incendios forestales y encaminar estrategias para el manejo del fuego (Calleja-Peláez *et al.* 2020).

El tipo de material combustible, su grado de compactación, la disposición espacial en el plano horizontal y vertical (Morfin-Ríos *et al.* 2012) y la estructura de la vegetación puede conllevar a efectos variables sobre el comportamiento del fuego (Odion *et al.* 2014). En Guerrero se han realizado algunos estudios sobre la cuantificación de combustibles forestales en bosque de encino (López-Moctezuma *et al.* 2015, Calleja-Peláez *et al.* 2020) y pino (López-López *et al.* 2023), aunque ninguno considera el efecto de las variables dasométricas sobre las cargas de combustible.

La relación de la profundidad de la capa de hojarasca y mantillo con sus respectivas cargas de combustible ha sido documentada previamente (Calleja-Peláez *et al.* 2021, López-López *et al.* 2023), la carga de material leñoso, hojarasca y mantillo con relación a carga total (Xelhuantzi-Carmona *et al.* 2011, Chávez-Duran *et al.* 2021, López-López *et al.* 2023) y el efecto de la pendiente sobre la carga de combustible por componente (Villers-Gómez *et al.* 2012, Calleja-Peláez *et al.* 2020).

La mayoría de estos estudios corresponden a bosques de pino y pino-encino, por ello surge la necesidad de investigar sobre la relación de estas variables con las cargas de combustible en bosque de encino. El entendimiento de la relación entre variables dasométricas y cargas de combustible aun es incipiente, tal es el caso de Caballero-Cruz *et al.* (2015) quienes evaluaron dos niveles de densidad del arbolado sobre las carga de combustible en bosque de pino y Castañeda-Rojas *et al.* (2015) registraron mayor c_{1h} en bosques de *P. hartwegii* ($p = 0.039$), sin embargo dichos resultados no son concluyentes sobre el efecto de las variables dasométricas sobre la disponibilidad de combustibles para un ecosistema dado.

El manejo técnico del bosque (Caballero-Cruz *et al.* 2018), requiere que se conozca la influencia de las variables dasométricas y pendiente sobre la carga de combustibles en los ecosistemas forestales. Por tal motivo, el objetivo de la presente investigación fue conocer la relación de variables dasométricas, pendiente, profundidad de las capas de hojarasca y mantillo con las cargas de combustible en bosque de encino en la región Montaña del estado de Guerrero, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en ecosistemas con vegetación de encino sin evidencia de la ocurrencia de incendios forestales en las localidades de El Tejocote (ET) y La Ciénega (LC) perteneciente al municipio de Malinaltepec; mientras que la comunidad de Plan de Guadalupe (PG) pertenece al municipio de Atlamajalcingo del Monte en el estado de Guerrero (Figura 1).

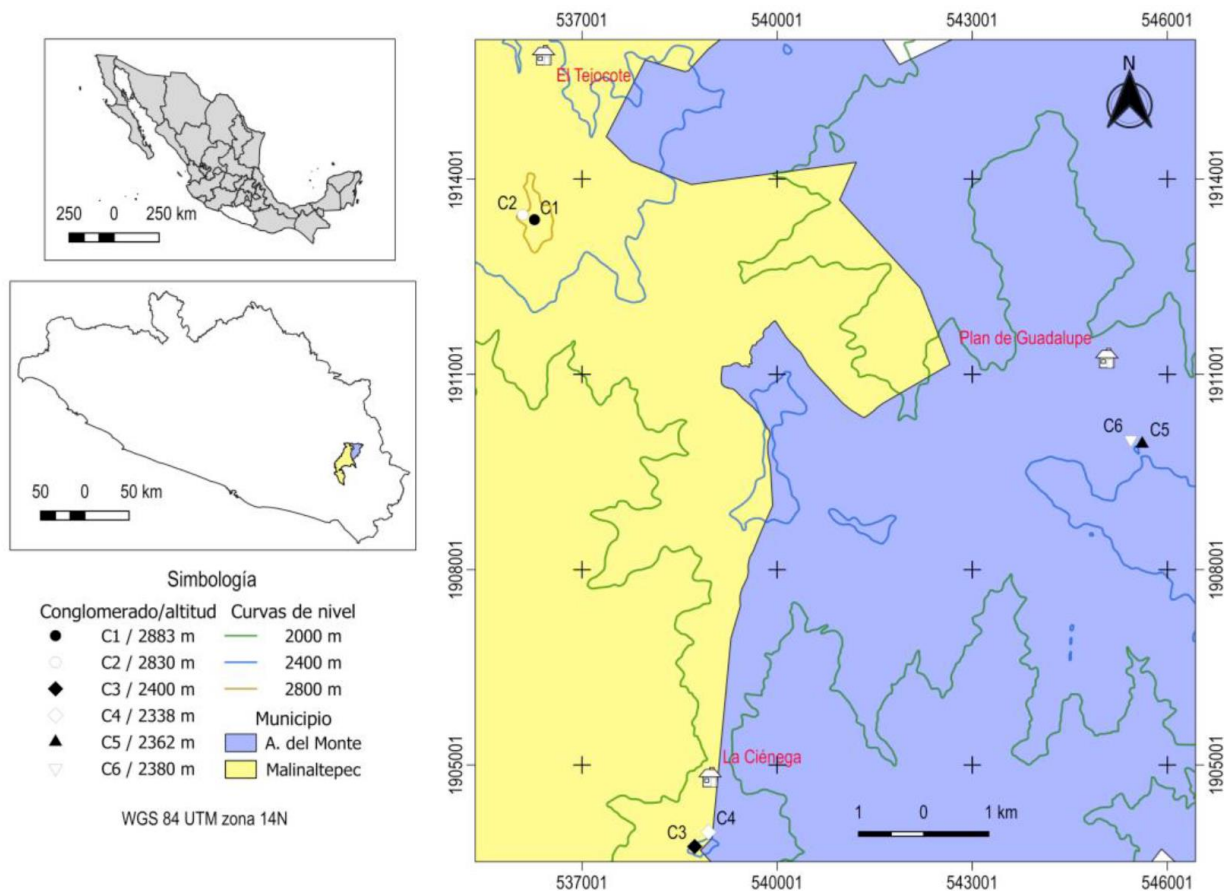


Figura 1. Ubicación geográfica de los conglomerados en los bosques de encino en la región montañosa del estado de Guerrero, México.

Las localidades el ET y LC comparten dos especies (*Quercus crassifolia* Née y *Quercus resinosa* Liebm.), mientras en PG se registraron seis especies diferentes (*Quercus calophylla* Schlttdl. y Cham., *Quercus elliptica* Liebm. ex A.DC., *Quercus magnoliifolia* Née, *Quercus obtusata* Bonpl., *Quercus scytophylla* Liebm. y *Quercus splendens* Née), seguido de LC con cuatro especies (*Quercus insignis* M. Martens & Galeotti, *Quercus laurina* Bonpl., *Quercus martinezii* C. H. Mull, *Quercus salicifolia* Née) y ET registró una especie diferente (*Quercus crispifolia* Trel.). El resto de las especies pertenecen a las familias Pinaceae (3), Araliaceae (2), Betulaceae (2), Ericaceae (2), Solanaceae (2), Clethraceae (1), Magnoliaceae (1), Primulaceae (1), Simplicaceae (1), entre otros.

El clima del área de estudio corresponde A(C)w2(w) semicálido subhúmedo y C(w2)(w) templado subhúmedo (INEGI 2008), la precipitación del área va de los 1 500 a 2000 mm (INEGI

2006) con una temperatura media anual de 16 a 18 °C (INEGI 2007). La separación entre localidades es de 10 km, los conglomerados se implementaron en un intervalo altitudinal de 2400 a 2900 msnm (Figura 1).

Caracterización dasométrica

Se adaptó la metodología para el remuestreo del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (CONAFOR 2015); las variables dasométricas se recabaron en cuatro sitios circulares de 400 m² (UMS = unidad de muestreo secundario) equidistantes a 45.14 m a partir del centro del sitio 1; los sitios 2, 3 y 4 se orientaron a 0, 120 y 240° de azimut quedando dispuestos en forma de Y invertida; el radio de la (UMP = Unidad de muestreo primario) fue de 56.42 m abarcando la superficie equivalente a una hectárea (Figura 2).

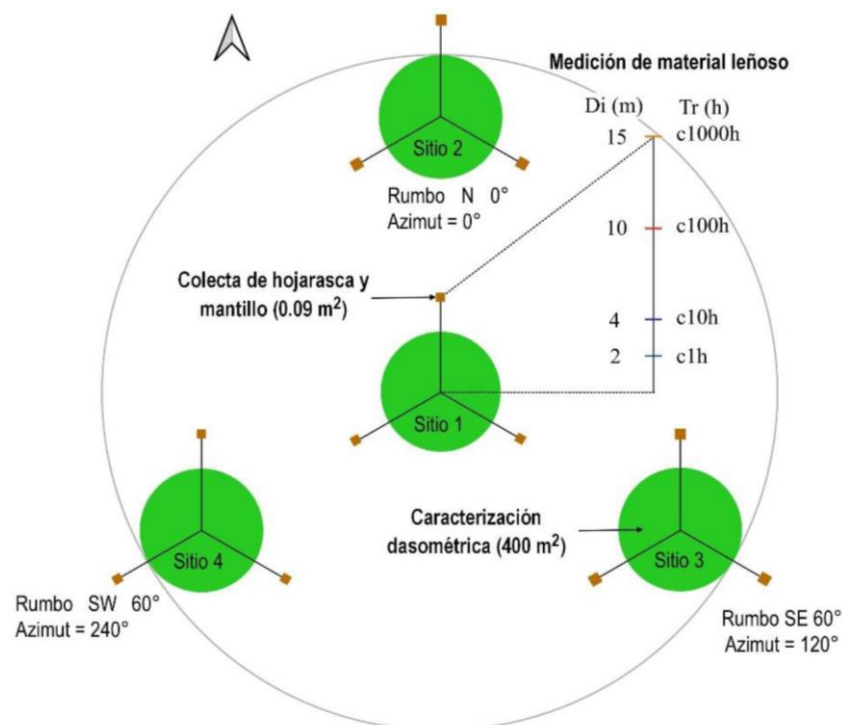


Figura 2. Conglomerados para el muestreo de combustibles forestales y caracterización dasométrica en bosques de encino en la región Montaña del estado de Guerrero. Di: distancia de medición. Tr: Tiempo de retardo del combustible.

Se registró la altura total (m) y diámetro normal (cm) del estrato arbóreo en individuos con diámetro mayor o igual a 2.5 cm en los sitios de 400 m². La información dasométrica en los sitios se empleó para estimar el número de árboles (Na), área basal (Ab), diámetro medio (Dm) y altura media (Am) considerando todas las especies de árboles registrado en los sitios de muestreo de acuerdo a las fórmulas descritas en la Tabla 1 (Aguirre-Calderón *et al.* 2003).

Evaluación de combustibles forestales

A partir del centro de sitio circular (UMS) se trazaron tres líneas de intersección planar de 15 m orientadas a 0°, 120° y 240° de azimut para el muestreo de combustibles leñosos (Figura 2)

de acuerdo a la técnica de intersecciones planares de Brown *et al.* (1982).

Tabla 1. Fórmulas para estimar las variables dasométricas con las cargas de combustible hojarasca y mantillo.

Variáveis dasométricas	Fórmula	Combustibles	Fórmula
Diámetro medio	$Dm = \sum D/n$	Hojarasca	$Ho = PSHo * 0.1111$
Altura media	$Am = \sum A/n$		
Área basal	$Ab = \sum ab * N$	Mantillo	$Ma = PSMa * 0.1111$
Número de árboles	$Na = n * N$		

Dm: diámetro medio por sitio (cm). D: diámetro (cm). Am: altura media por sitio (m). A: altura (m). n: árboles por sitio. Ab: área basal (m² ha⁻¹). ab: área basal por sitio. Na: número de árboles ha⁻¹. N: número de sitios en una hectárea. Ho: hojarasca. Ma: mantillo. PSHo: Peso seco de la hojarasca (g). PSMa: Peso seco del mantillo (g). 0.1111: factor de conversión de g en 0.09 m² a t ha⁻¹.

En cada línea se contabilizaron los combustibles leñosos por “tiempo de retardo” considerado como el tiempo necesario para que los combustibles ganen o pierdan el 66 % de su contenido de humedad en relación a la temperatura del ambiente (Barrios-Calderón *et al.* 2024). Por ello, el c1h se contabilizó a 2 m, el c10h a los 4 m y el c100h a los 10 m con un calibrador, el diámetro del c1000h se midió en toda la línea de 15 m con un flexómetro (López-López *et al.* 2023).

Al final de cada línea de intersección planar se colectaron muestras de hojarasca (Ho) y mantillo (Ma) en 0.09 m², a cada muestra se le midió su profundidad con un flexómetro. La Ho y Ma se sometió a un proceso de secado en estufa a 70 °C para obtener su peso seco constante en 72 h (Ruiz-Corzo *et al.* 2022). Las cargas de Ho y Ma se estimaron con las ecuaciones de Calleja-Peláez *et al.* (2020) y López-López *et al.* (2023) descritas en la Tabla 1.

Estimación de la carga de carga de los combustibles leñosos

El peso de los combustibles leñosos se estimó con las fórmulas descritas en la Tabla 2 (Brown 1974), el cual se le aplicó un factor de corrección de 1.675 y 2.01 considerando una densidad básica de la madera para encinos de 0.67 g cm³ (Bonilla-Padilla *et al.* 2012, Martínez-Villa *et al.* 2018).

Tabla 2. Fórmula para calcular el peso de combustibles leñosos (Brown 1974) ajustada para encinos.

Clase diamétrica (cm)	Tiempo de retardo (horas)	Fórmula
0-0.6	c1h	$P = (0.484 * F * C)/(N * L) * 2.01$
0.6-2.5	c10h	$P = (3.369 * F * C)/(N * L) * 2.01$
2.6-7.5	c100h	$P = (36.808 * F * C)/(N * L) * 1.675$
>7.5 (sin pudrición)	c1000h	$P = (1.46 * d^2 * C)/(N * L) * 1.675$
>7.5 (con pudrición)		$P = (1.21 * d^2 * C)/(N * L) * 1.675$

P = Peso del combustible en t ha⁻¹; F = número de intersecciones; C = factor de corrección por la pendiente del terreno (%); L = Longitud de la línea de muestreo dada en pies lineales [ft]: 1 m = 3.28 ft; d² = diámetro al cuadrado de piezas leñosas mayor a 7.5 cm.

Análisis estadístico

Los datos de cargas de combustible y variables dasométricas cumplieron el supuesto de normalidad (Shapiro y Wilk 1965), por lo que se procedió a aplicar la prueba de medias de Tukey para detectar diferencia de las variables dasométricas y cargas de combustible por conglomerado y localidad ($\alpha = 0.05$), los análisis estadísticos se realizaron en el Software estadístico IBM SPSS versión 20 (SPSS 2011).

Por último, se realizó el análisis de correlación de Pearson a las variables dasométricas (Na, Ab, Dm, Am), profundidad de la capa de hojarasca y mantillo (Ph, Pm) y pendiente del terreno (Pe) con las cargas de combustible por tiempo de retardo (c1h, c10h, c100h y c1000h), hojarasca (Ho) y mantillo (Ma), el gráfico de correlación se generó en el paquete metan: Multi Environment Trials Analysis (Olivoto y Lucio 2023) implementado en el software R® (R Core Team 2023).

RESULTADOS

Características dasométrica del arbolado

No se encontró diferencia entre localidades para el Dm con valores de 15.6 a 21.3 cm, el C2 (25.0 cm) fue mayor a los 12.4 cm del C4 (Tabla 3). La Am no denotó diferencia entre localidades (10.5 a 11.5 m), ni entre conglomerados con valores de 8 a 13.4 m (Tabla 3). El Na resultó mayor en LC con 1303 árboles ha^{-1} , mientras que PG y ET solamente registraron 666 y 672 árboles ha^{-1} ($p < 0.05$); los 1625 árboles ha^{-1} del C4 fue estadísticamente mayor al resto de los conglomerados (Tabla 3). El Ab en la comunidad ET fue de 38.3 $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ y representó el doble de los 19.3 $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ registrado en PG; el C2 registró 47 $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ de Ab que fue estadísticamente mayor a los 14.8 $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ del C5 (Tabla 3).

Carga de combustible leñoso

La comunidad de LC mostró mayor c1h (1.91 t ha^{-1}) respecto a los 1.01 y 0.56 t ha^{-1} conferida en PG y ET (Figura 3a), la comparación entre conglomerados evidenció mayor carga en C4 (2.88 t ha^{-1}), seguido el C6 (1.43 t ha^{-1}), los conglomerados con cargas de 0.56 a 0.94 t ha^{-1} resultaron estadísticamente iguales (Figura 3b). El c10h no mostró diferencia entre localidades, los 3.29 t ha^{-1} del C4 fue mayor a los 0.62 t ha^{-1} del C3 (Figura 3b). Los 6.25 t ha^{-1} del c100h en PG resultó mayor a los 1.09 t ha^{-1} de LC (Figura 3a), el C6 (8.04 t ha^{-1}) fue mayor a los 1.09 t ha^{-1} registrado en C3 (Figura 3b). El c1000h no exhibió diferencia entre localidades (2.78 a 5.88 t ha^{-1}), ni entre conglomerados con valores de 1.52 a 10.25 t ha^{-1} (Figura 3b).

Carga de combustible por componente y total

No se registró diferencia para la Ct entre localidades con cargas de 27.6 a 38.1 t ha^{-1} ($p = 0.199$); la Ct en C5 y C4 con 43.9 y 46.5 t ha^{-1} fue mayor a los 23.2 y 23.7 t ha^{-1} del C1 y C3, el resto de los conglomerados no mostraron diferencia estadística (Tabla 4). El Ma (9.6 a 19.7 t ha^{-1}) y MI (8.3 a 11.8 t ha^{-1}) no evidenciaron diferencia entre localidades (Tabla 4).

La Ho fue mayor en PG con 12.7 t ha^{-1} , la carga más baja de MI correspondió al C3 (4.6 t ha^{-1}) y resultó menor a los 16.9 t ha^{-1} del C2 (Tabla 4). La Ho exhibió mayor carga en C5 (13.6 t ha^{-1}) respecto 5.9 t ha^{-1} del C1, el Ma mostró mayor diferencia donde el C4 registró hasta 27.9 t ha^{-1}

ha⁻¹ resultado superior a las cargas conferidas en C1, C2, C3 y C6, mientras los 20.8 t ha⁻¹ del C5 solamente fue diferente al C6 con 7.3 t ha⁻¹ (Tabla 4).

Tabla 3. Comparación de medias de variables dasométricas según la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) en bosques de encino por conglomerado y localidad.

Variable	Estadístico	Localidades			Conglomerados					
		ET	LC	PG	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Dm	\bar{x}	21.3A	15.8A	15.6A	17.7ab	25.0b	19.1ab	12.4a	14.0ab	17.4ab
	De	7.3	6.5	2.7	7.5	5.8	7.9	2.2	1.5	2.6
	Cv	34.4	41.3	17.0	42.1	23.3	41.5	17.8	10.5	15.1
Am	\bar{x}	11.5A	11.0A	10.5A	9.6a	13.4a	12.0a	10.0a	8.0a	13.0a
	De	2.8	3.0	3.3	2	2.1	4.3	0.5	0.8	2.9
	Cv	24.1	27.4	31.4	20.6	15.8	36.0	5.0	9.9	22.4
Na	\bar{x}	672A	1303B	666A	819a	525a	981a	1625b	594a	738a
	De	426	450	252	589	140	430	102	284	231
	Cv	62	35	38	72	27	44	6	48	31
Ab	\bar{x}	38.3B	35.5AB	19.3A	29.7ab	47.0b	32.7ab	38.3ab	14.8a	23.8ab
	De	18.6	7.9	9.4	19.9	14.7	3.0	10.7	6.3	10.5
	Cv	48.6	22.1	48.6	66.9	31.3	9.3	27.9	42.7	44.2

\bar{x} : media. De: desviación estándar. Cv: Coeficiente de variación. ET: El Tejocote. LC: La Ciénega. PG: Plan de Guadalupe. C1, C2, C3, C4, C5, C6: Conglomerado. Dm: diámetro medio por sitio (cm). Am: altura media por sitio (m). Na: número de árboles ha⁻¹. Ab: área basal m² ha⁻¹.

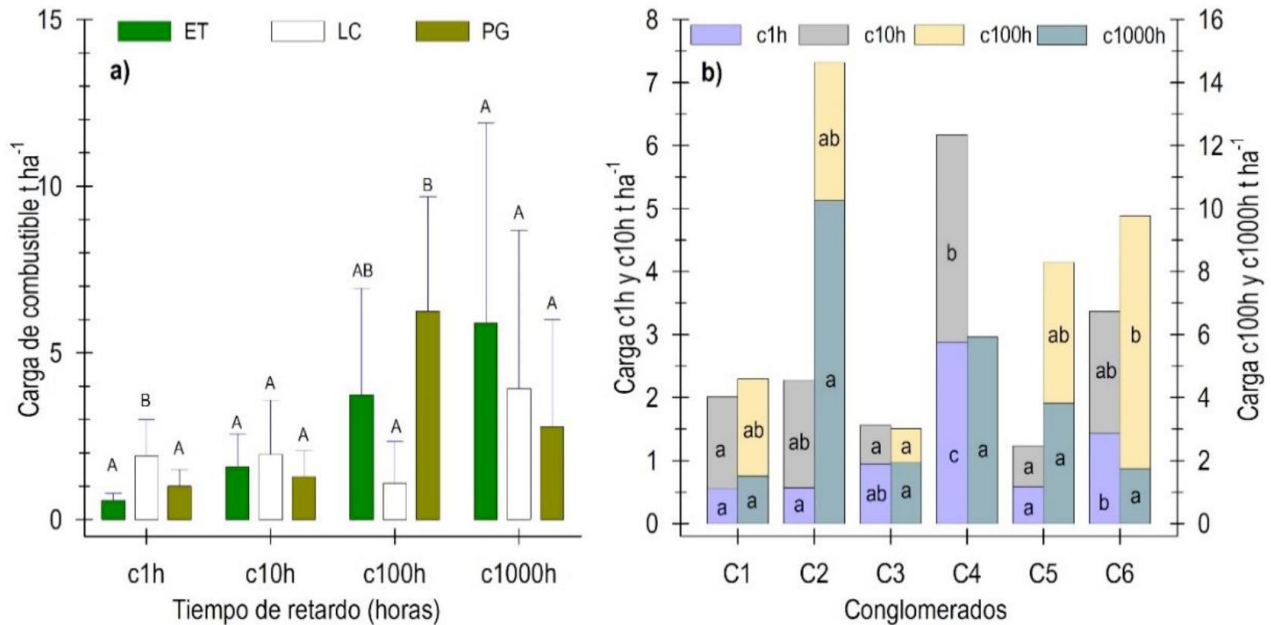


Figura 3. Comparación de medias Tukey ($\alpha = 0.05$) de cargas de combustible por tiempo de retardo. a) localidad y b) conglomerado. Letras distintas indican diferencias entre localidades (A-B) y conglomerados (a-c). c1h: combustible de 1 h. c10h: combustible de 10 h. c100h: combustible de 100 h. c1000h: combustible de 1000 h.

Tabla 4. Comparación de medias de cargas de combustibles (t ha⁻¹) según la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) en bosques de encino por componente entre localidades y conglomerados.

Componente	Estadístico	Localidad			Conglomerado					
		ET	LC	PG	C1	C2	C3	C4	C5	C6
MI	\bar{x}	11.8A	8.3A	11.3A	6.6ab	16.9b	4.6a	12.1ab	9.5ab	13.1ab
	De	7.5	5.8	4.1	6.7	3.8	3.5	5.5	2.0	5.1
	Cv	63.5	70.1	36.0	100.1	22.7	75.5	45.3	20.7	38.9
Ho	\bar{x}	6.2A	6.8A	12.7B	5.9a	6.4ab	7.1ab	6.5ab	13.6b	11.9ab
	De	3.2	2.2	3.6	3.4	3.5	2.0	2.6	4.8	2.2
	Cv	52.0	32.4	28.1	57.1	55.0	28.4	40.8	35.3	18.9
Ma	\bar{x}	9.6A	19.7A	14.1A	11.1ab	8.1ab	11.5ab	27.9c	20.8bc	7.3a
	De	3.3	10.9	9.5	3.6	2.7	2.6	9.4	7.4	5.9
	Cv	34.8	55.0	67.5	32.6	32.8	22.3	33.7	35.4	80.9
Ct	\bar{x}	27.6A	34.9A	38.1A	23.7a	31.4ab	23.2a	46.5b	43.9b	32.3ab
	De	8.5	14.0	11.7	10.2	4.7	1.5	9.7	13.2	7.3
	Cv	30.7	40.2	30.6	43.1	15.1	6.5	20.8	30.1	22.5

\bar{x} :Media. De: Desviación estándar. Cv: Coeficiente de variación. ET: El Tejocote. LC: La Ciénega. PG: Plan de Guadalupe. C1, C2, C3, C4, C5 y C6: Conglomerados.

Relación de cargas de combustible con variables físicas y dasométricas

El c1h mostró relación con el Na y c10h ($r = 0.72$ y 0.71 ; $p < 0.001$), seguido de la Pe y Dm con $r = 0.51$ y -0.41 ($p < 0.05$); la correlación del c10h fue similar para la Pe y Ab ($r = 0.51$, $p < 0.05$), seguido del Na con $r = 0.42$ y $p < 0.05$ (Figura 4a), los c100h y c1000h no evidenciaron correlación con las variables dasométricas y pendiente ($p > 0.05$).

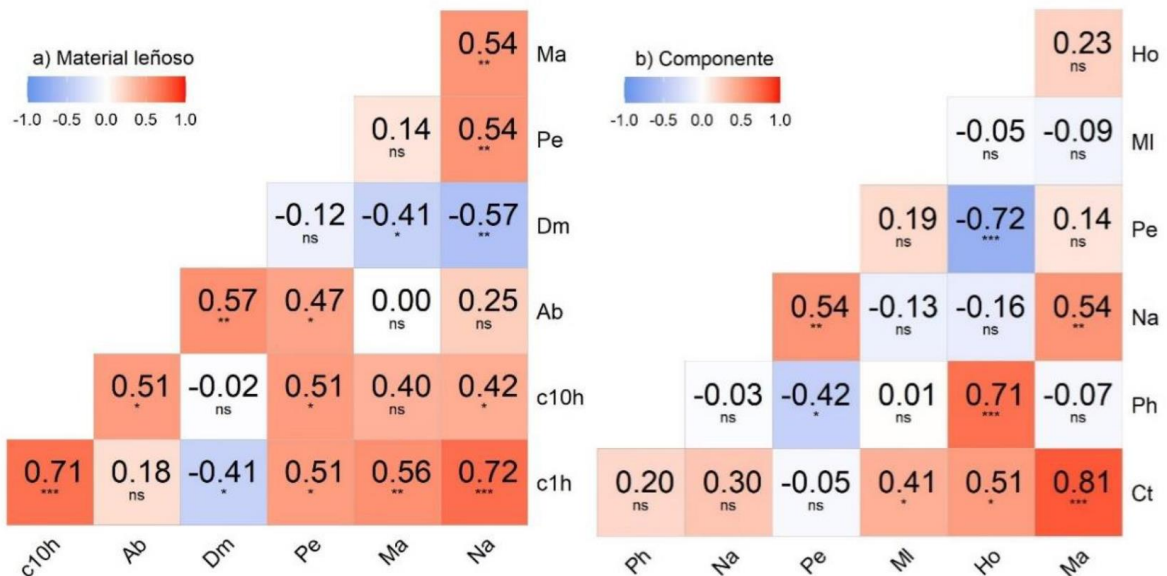


Figura 4. Correlación de Pearson de a) cargas de combustible por tiempo de retardo y b) cargas de combustible por componente y total. c1h: combustible de 1 h. c10h: combustible de 10 h. Ab: área basal m² ha⁻¹. Dm: Diámetro medio por sitio (cm). Ct: carga total. Ph: Profundidad de la hojarasca (cm). Na: número de árboles ha⁻¹. Pe: Pendiente (%). MI: material leñoso. Ma: mantillo. Ho: hojarasca. Significancia de la correlación ns: $p \geq 0.05$. *: $p < 0.05$. **: $p < 0.01$. ***: $p < 0.001$.

La Ct mostró relación con el Ma ($r = 0.81$, $p < 0.001$), seguido de la Ho y MI con $r = 0.51$ y 0.41 ($p < 0.05$); la Ho mostró relación con la Ph y Pe para valores de $r = 0.71$ y -0.72 respectivamente ($p < 0.001$) indicando que a mayor Pe se reduce la carga de Ho, el Ma y MI no mostraron relación con el resto de las variables (Figura 4b).

DISCUSIÓN

Caracterización dasométrica del arbolado

La información dasométrica exhibió mayor variabilidad del Na con valores de 300 a 1725 árboles ha^{-1} ($\text{Cv} = 54\%$), que está dentro del intervalo de 387 árboles ha^{-1} (Castañeda-Rojas *et al.* 2015) y 1357 árboles ha^{-1} (López-López *et al.* 2024) lo que confiere representatividad de dicha variable a las condiciones del bosque de encino evaluado. El Ab mostró un $\text{Cv} = 48\%$ (6 a 68 $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$) que está dentro del intervalo de 10 a 49 $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ de area basal en bosques de *Pinus douglasiana* (Quintero-Gradilla *et al.* 2019) y 26.6 a 39.4 $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ en humedales tropicales (Barrios-Calderón *et al.* 2024). El Dm (10 a 31 cm) y Am (7 a 18 m) de los sitios muestreados confieren un Cv de 35 y 27 % respectivamente, la baja variabilidad de la Am incide en que la variable no contribuya a explicar la carga de combustible en los bosques de encino evaluados.

Cargas de combustible por componente

La Ct en los conglomerados osciló de 23.2 a 46.5 t ha^{-1} , dichas cargas concuerdan con los 27.2 t ha^{-1} en encinares tropicales dominado por *Quercus peduncularis* Née, *Quercus skinneri* Benth. y *Quercus magnoliifolia* Née (Rodríguez-Trejo *et al.* 2018), mientras que en un bosque de pino López-López *et al.* (2023) registraron 35.5 t ha^{-1} , aunque Caballero-Cruz *et al.* (2018) y Rubio-Camacho *et al.* (2016) cuantificaron 46.8 y 49.6 t ha^{-1} de combustible relacionado a una densidad de 1784 y 5634 árboles ha^{-1} respectivamente.

El Ma registró mayor carga en los C1, C3, C4 y C5 (11.1 – 27.9 t ha^{-1}) que representa más del 50 % de Ct, por consiguiente, los 17.9 t ha^{-1} consignado por Ruiz-Corzo *et al.* (2022) y 23.3 t ha^{-1} documentado por Rubio-Camacho *et al.* (2016) se relacionan a periodos prolongados sin la ocurrencia de un incendio en los ecosistemas. El MI registró cargas de 4.6 a 16.9 t ha^{-1} que está en sintonía con los 3.8 a 17.7 t ha^{-1} registrado en otros estudios (Calleja-Peláez *et al.* 2020, Rodríguez-Trejo *et al.* 2018, Ruiz-Corzo *et al.* 2022, Rubio-Camacho *et al.* 2016); aunque es menor a los 41.9 y 45.5 t ha^{-1} registrado por Caballero-Cruz *et al.* (2018).

Correlación de cargas de combustible con variables dasométricas y pendiente

La relación entre Ct con Ma y Ho ($r = 0.88$ y 0.50) no es exclusivo para bosque de encino ya que Chávez-Duran *et al.* (2021) registraron correlación en bosque de pino-encino ($r = 0.97$ y 0.71), mientras que en bosque de pino López-López *et al.* (2023) reportaron valores de $r = 0.89$ y 0.83 . La mortalidad del arbolado en un incendio forestal altera la dinámica de los combustibles de acuerdo a los resultados de López-López *et al.* (2023) al registrar un $r = 0.95$ para la relación MI - Ct en un área incendiada, por el contrario, en un incendio de baja intensidad la correlación de Ct con Ho ($r = 0.74$) y Ma ($r = 0.86$) se mantiene (Xelhuantzi-Carmona *et al.* 2011).

El Na exhibió correlación con el c1h y c10h ($r = 0.72$ y 0.42) al registrar mayores cargas de dicho componente en C4 con 1.43 y 1.64 t ha^{-1} correspondiente a densidades de $1\ 625$ árboles ha^{-1} , menores cargas de c1h (0.28 t ha^{-1}) y c10h (0.31 t ha^{-1}) corresponden a sitios de menor densidad por ello, se confirma que a mayor densidad del arbolado se presentó mayor cargas de c1h y c10h. Similarmente Castañeda-Rojas *et al.* (2015) registraron mayor c1h en bosque denso con 0.30 t ha^{-1} (387 árboles ha^{-1}) sobre bosques semidenso y fragmentada de *Pinus hartwegii*, mayores cargas de c10h se relacionan a conglomerados con Ab de 38.3 y $47.0 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ ($r = 0.51$).

La Pe exhibió correlación con el c1h y c10h ($r = 0.51$), similarmente Calleja-Peláez *et al.* (2020) evidenciaron correlación de la Pe con el c1h ($r = 0.64$), mientras Villers-Gómez *et al.* (2012) documentaron la influencia de la pendiente y altitud sobre los c1h. El Dm evidencio correlación negativa sobre el c1h ($r = -0.41$), por ello un Dm de 12.4 cm mostró una carga de 1.43 t ha^{-1} en el C4 y a medida que se incrementó el diámetro de los árboles del sitio se registraron menos ramillas con diámetro menor o igual a 0.6 cm .

Cargas de combustible por tiempo de retardo

El c1h denotó una carga menor 3.0 t ha^{-1} , aunque su diámetro pequeño lo hace sensible a las condiciones atmosféricas y pierden humedad con facilidad (Lutes *et al.* 2009), además, su rápida inflamabilidad lo hacen sensible a iniciar incendios forestales en la época de seca (D'Este *et al.* 2021). Se consignaron cargas de 0.62 a 3.29 t ha^{-1} para el c10h que está dentro del intervalo de 0.23 a 3.09 t ha^{-1} conferida en otras investigaciones (López-López *et al.* 2023, Ruiz-Corzo *et al.* 2022, Rodríguez-Trejo *et al.* 2018); cargas altas de 3.2 a 6.8 t ha^{-1} se registraron en bosques fragmentados (Castañeda-Rojas *et al.* 2015), con alta densidad y asociado a periodos prolongados sin ocurrencia de incendios (Caballero-Cruz *et al.* 2018; Rubio-Camacho *et al.* 2016).

Los c100h registraron cargas de 1.09 a 8.04 t ha^{-1} que está dentro del intervalo de 0.38 a 3.5 t ha^{-1} registrado por Calleja-Peláez *et al.* (2020) y 1.80 a 2.58 t ha^{-1} cuantificado por Rodríguez-Trejo *et al.* (2018) para bosque de encino. Finalmente, el c1000h exhibió cargas de 1.52 a 10.25 t ha^{-1} , similar a los 1.93 t ha^{-1} reportado por Calleja-Peláez *et al.* (2020) y 4.1 a 5.38 t ha^{-1} consignado por Rubio-Camacho *et al.* (2016), sin embargo, su presencia se maximizó en bosques de alta densidad con 17.96 t ha^{-1} (Caballero-Cruz *et al.* 2018), fragmentados con 22.9 t ha^{-1} (Castañeda-Rojas *et al.* 2015) e incendiadas hasta con 34.3 t ha^{-1} (López-López *et al.* 2023), lo que en la práctica conllevan a alterar el régimen del fuego en los ecosistemas.

CONCLUSIONES

Las variables dasométricas Na, Dm y Ab solo explican la carga de c1h y c10h por lo que es importante aplicar la extracción de árboles suprimidos para disminuir la densidad del arbolado. La Ct en los bosques de encino se explica en gran medida por la presencia de Ma, Ho y MI, se registró correlación entre el espesor y la carga de Ho lo que da pauta a estimar dicho componente en campo. Las áreas evaluadas presentan alta acumulación de Ma y Ho lo que indica que el fuego no es un fenómeno recurrente en dichas áreas al registrar cargas de combustible mayor a 23 t ha^{-1} . Se requiere implementar estrategias de prevención de incendios forestales como brechas corta

fuego, líneas negras y remoción de combustible para evitar la ocurrencia de incendios forestales catastróficos.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por la beca con número de apoyo: 809963. A la Dra. Marisa Silva Aparicio encargada del laboratorio de plantas de la Universidad Intercultural del Estado de Guerrero por la identificación de especies y a la M. C. Beatriz Calleja Peláez por su apoyo en el trabajo de campo.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen conflicto de interés.

LITERATURA CITADA

- Aguirre-Calderón ÓA, Jiménez-Pérez J, Kramer H, Akça A (2003) Análisis estructural de ecosistemas forestales en el Cerro del Potosí, Nuevo León, México. *Ciencia UANL* 6(2): 219-225.
- Barrios-Calderón RdJ, Infante-Mata D, Flores-Garnica JG, Torres JR (2024) Forest Fuel Bed Variation in Tropical Coastal Freshwater Forested Wetlands Disturbed by Fire. *Forests* 15 (158): 1-19. <https://doi.org/10.3390/f15010158>
- Bonilla-Padilla E, Rodríguez-Trejo DA, Borja de la Rosa A, Cíntora-González C, Santillán-Pérez J (2012) Dinámica de combustibles en rodales de encino-pino de Chignahuapan, Puebla. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 4(19): 20-33. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v4i19.376>.
- Brown JK (1974) Handbook for inventorying downed woody material. Gen. Tech. Rep. INT-16. US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. Ogden, USA. 24p.
- Brown JK, Oberheu RD, Johnston CM (1982) Handbook for inventorying surface fuels and biomass in the interior West. Gen. Tech. Rep. INT-129. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. Ogden, USA. 48p.
- Caballero-Cruz P, Santiago-Juárez W, Martínez-Santiago D, Cruz-Santiago OL, Pérez-Silva ER, Aguirre-Calderón OA (2018) Combustibles forestales y susceptibilidad a incendios de un bosque templado en la Mixteca Alta, Oaxaca, México. *Foresta Veracruzana* 20(1): 9-14.
- Calleja-Peláez B, López-López B, Méndez-González J, Ríos-Camey JM, Gutiérrez-Merino E (2020) Tamaño de muestra para estimar cargas de combustible en bosque de encino en la región Montaña de Guerrero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 11(57): 174-195. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i57.617>
- Castañeda-Rojas MF, Endara-Agramont AR, Villers-Ruiz MDL, Nava-Bernal EG (2015) Evaluación forestal y de combustibles en bosques de *Pinus hartwegii* en el Estado de México según densidades de cobertura y vulnerabilidad a incendios. *Madera y bosques* 21(2): 45-58. <https://doi.org/10.21829/myb.2015.212444>
- Cochrane MA (2009) *Tropical fire ecology: Climate change, land use, and ecosystem dynamics*. Springer. Berlin. 645p.
- CONAFOR (2015) *Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Procedimientos de muestreo*. Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jalisco, México. 261p.
- Chávez-Durán AA, Bustos-Santana A, Chávez-Durán HM, De la Mora-Orozco C, Flores-Garnica JG, Rubio-Camacho EA, Xelhuantzi-Carmona J (2021) Distribución espacial de cargas de combustibles en una parcela de muestreo de pino-encino. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 12(65): 112-133. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i65.787>

- D'Este M, Elia M, Giannico V, Spano G, Laforteza R, Sanesi G (2021) Machine learning techniques for fine dead fuel load estimation using multi-source remote sensing data. *Remote Sensing* 13(1658): 1-17. <https://doi.org/10.3390/rs13091658>
- Gould WA, González G, Hudak AT, Hollingsworth TN, Hollingsworth J (2008) Forest structure and downed woody debris in boreal, temperate, and tropical forest fragments. *AMBIO - A Journal of the human Environment* 37: 577-587.
- INEGI (2006) Conjunto de datos vectoriales, escala 1: 1 000 000. Precipitación media anual. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267544>. Fecha de consulta: 2 de enero de 2023.
- INEGI (2007) Conjunto de datos vectoriales, escala 1: 1 000 000. Temperatura media anual. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267551>. Fecha de consulta: 2 de enero de 2023.
- INEGI (2008) Conjunto de datos vectoriales, escala 1: 1 000 000. Unidades Climáticas. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267568>. Fecha de consulta: 2 de enero de 2023.
- López-Moctezuma MÁ, Rodríguez-Trejo DA, Santiago-Cortés F, Sereno-Chávez VA, Granados-Sánchez D (2015) Tolerancia al fuego en *Quercus magnoliifolia*. *Revista Árvore* 39(3): 523-533.
- López-López B, Calleja-Peláez B, Flores-Altamirano M y Rosales-Reyes CA (2023) Análisis comparativo de cargas de combustible en área afectada por incendio y sin incendio en Malinaltepec, Guerrero. *e-CUCBA* (19): 01-06. <https://doi.org/10.32870/ecucba.vi19.257>
- López-López B, Flores-Garnica JG, Aguirre-Calderón OA (2024) Aplicación y simulación de una quema prescrita en un bosque de encino-pino en Guerrero, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 11(1): 1-13. <https://doi.org/10.19136/era.a11n1.3890>
- Lutes DC, Keane RE, Caratti JF (2009) A Surface Fuel Classification for Estimating Fire Effects. *International Journal of Wildland Fire* (18): 802-814. <https://doi.org/10.1071/WF08062>
- Morfin-Ríos JE, Jardel-Peláez EJ, Alvarado-Celestino E y Michel-Fuentes JM (2012) Caracterización y cuantificación de combustibles forestales. CONAFOR-UDG. 1ra Edición. Editorial Universitaria. Guadalajara, Jalisco, México. 94p
- Odion DC, Hanson CT, Arsenault A, Baker LW, DellaSala DA, Hutto RL, Klenner W, Moritz MA, Sherriff RL, Veblen TT, Williams MA (2014) Examining historical and current mixed-severity fire regimes in ponderosa pine and mixed-conifer forests of Western North America. *PLoS ONE* 9(2): e87852. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0087852>
- Olivoto T, Lúcio ADC (2020) Metan: An R package for multi-environment trial analysis. *Methods in Ecology and Evolution*. 11(6): 783-789. doi:10.1111/2041-210X.13384.
- Quintero-Gradilla SD, Jardel-Peláez EJ, Cuevas-Guzmán R, García-Oliva F, Martínez Yrizar A (2019) Cambio postincendio en la estructura y composición del estrato arbóreo y carga de combustibles en un bosque de *Pinus douglasiana* de México. *Madera y Bosques* 25(3): 1-14. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2531888>
- R Core Team (2023) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>. Fecha de consulta: 29 de noviembre de 2023.
- SPSS (2011) IBM SPSS Statistics for Windows. Version 20.0. IBM Corp. New York, USA.
- Rodríguez-Trejo DA, Myers RL (2010) Using oak characteristics to guide fire regime restoration in Mexican pine-oak and oak forests. *Ecological Restoration* 28(3): 304-323. <https://doi.org/10.3368/er.28.3.304>
- Rodríguez-Trejo DA, Pulido-Luna JA, Martínez-Muñoz P, Martínez-Lara PJ, Monjarás-Vega NA (2018) Análisis comparativo de quemas prescritas aplicadas a encinares tropicales. *Agrociencia* 52(6):783-801.
- Rubio-Camacho EA, González-Tagle MA, Benavides-Solorio JDD, Chávez-Durán ÁA, Xelhuantzi-Carmona J (2016) Relación entre necromasa, composición de especies leñosas y posibles implicaciones del cambio climático en bosques templados. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7(SPE13): 2601-2614.
- Ruiz-Corzo R, Aryal DR, Venegas SA, Jerez RDO, Fernández ZKS, López CSDC, Velázquez SCA (2022) Dinámica temporal de combustibles forestales y efecto del incendio en Cerro Nambiyugua, Chiapas, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 9(2): 1-12. <https://doi.org/10.19136/era.a9n2.3253>

- Shapiro SS, Wilk MB (1965) An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 52(3/4): 591-611.
- Valdés L, Martínez LW, Bonilla M, Castillo I (2016) Efectos del fuego en algunas características de suelos de pinares, Macurije, Pinar del Río, Cuba. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 12(2): 60-65.
- Martínez-Villa JL, Rodríguez-Trejo DA, Borja-de la Rosa Ma. AM, Rodríguez-Yam GA (2018). Propiedades físicas y dinámica de los combustibles forestales en un bosque de encino. *Madera y Bosques*. 24(2): e2421467. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421467>
- Villers-Gómez S, Villers-Ruiz L, López-Blanco J (2012) Modelos que relacionan las características biofísicas del terreno con la presencia de combustibles forestales en las montañas centrales de México. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* (59): 367-476.
- Xelhuantzi-Carmona J, Flores-Garnica JG, Chávez-Durán ÁA (2011) Análisis comparativo de cargas de combustibles en ecosistemas forestales afectados por incendios. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(3): 37-52. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v2i3.624>