

Artículo

Estrategias de muestreo para el inventario de combustibles forestales en un bosque de *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl.

Magali Reyes-Mateo¹, Romeo de Jesús Barrios-Calderón^{1*}, Raisa Yarina Escalona-Domenech¹, Emir Falcón Oconor², Imna Yolanda Trigueros-Vázquez¹ y Magdiel Gabriel-Hernández¹

¹ Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Chiapas, Entronque carretera costera y Huehuetán Pueblo, C.P. 30660, Huehuetán, Chiapas, México; maguimateo27@gmail.com (M.R.-M.); romeo.barrios@unach.mx (R.J.B.-C.); raisayed2015@gmail.com (R.Y.E.-D); imna.trigueros@unach.mx (I.Y.T.-V.); magdiel.gabriel@unach.mx (M.G.-H.).

² Facultad Agroforestal, Universidad de Guantánamo, Av. Che Guevara km 1.5, carretera Jamaica, C. P. 95100, Guantánamo, Cuba. efalconconor@gmail.com

* Correspondencia: romeo.barrios@unach.mx (R.J.B.-C.)

Resumen: Introducción: El estudio de los combustibles forestales permite definir estrategias precisas de manejo del fuego en zonas forestales. Sin embargo, existe incertidumbre acerca del nivel de precisión de los inventarios de combustibles y del número suficiente de líneas de muestreo al aplicar la técnica de intersecciones planares. **Objetivo:** Determinar la carga de combustibles forestales en un bosque de *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl del municipio de Motozintla de Mendoza, Chiapas, aplicando diferentes esquemas de muestreo (número de líneas) que permita mayor precisión y rigor estadístico. **Metodología:** Se aplicó la técnica de intersecciones planares para determinar las cargas de combustibles leñosos y hojarasca, estableciendo de 5 a 40 líneas de muestreo. **Resultados:** El mejor esquema de muestreo fue el de 40 líneas ha⁻¹ para la carga total de combustibles forestales leñosos y de hojarasca. De los cuatro sitios evaluados, el sitio 3 mostró mayor acumulación de combustibles leñosos (56.44 ± 5.01 t ha⁻¹) y el sitio 1 (19.71 ± 2.47 t ha⁻¹) para combustibles de hojarasca. **Conclusiones:** Es importante mantener el esquema mínimo de 40 líneas ha⁻¹, dado a que, a medida que se incrementa el número de transectos lineales, se reduce la desviación estándar y el error de muestreo.

Palabras clave: carga de combustible; intersecciones planares; esquemas de muestreo; incendios forestales.

Sampling strategies for forest fuel inventory in a *Pinus oocarpa* forest Schiede ex Schltdl.

Abstract: Introduction: The forest fuels study allows us to define precise fire management strategies in forest areas. However, there is uncertainty about the level of precision of fuel inventories and the sufficient number of test lines to apply the planar intersection technique. **Objective:** Determine the forest fuel load in a forest of *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl of the municipality of Motozintla of Mendoza, Chiapas, applying different sampling schemes (number of lines) that allow greater precision and statistical rigor. **Methodology:** The planar intersection technique was applied to determine the loads of woody and leaf litter fuels, establishing 5 to 40 test lines. **Results:** The best monitoring scheme was 40 lines ha⁻¹ for the total load of woody and leaf litter fuels. Of the four sites evaluated, site 3 showed the highest accumulation of woody fuels (56.44 ± 5.01 t ha⁻¹) and site 1 (19.71 ± 2.47 t ha⁻¹) for leaf litter fuels. **Conclusions:** It is important to maintain the minimum scheme of 40 lines ha⁻¹, given that, as the number of linear transects increases, the standard deviation and measurement error are reduced.

Keywords: fuel load; planar intersections; sampling schemes; forest fires.

1. Introducción

Uno de los elementos esenciales para que ocurra un incendio es el combustible forestal, el cual se define como el material vegetal o la biomasa producida por los árboles (Walker *et al.*, 2020) que puede arder, al ser expuesto a una fuente de calor (Nájera, 2015). Esto es, la biomasa de plantas vivas y muertas, además de otra materia orgánica en el bosque, que puede encenderse y alimentar el proceso de combustión (Barrios-Calderón *et al.*, 2018). Los combustibles acumulados en las áreas forestales son el factor fundamental para la propagación de un incendio, siendo el único componente del triángulo del fuego (exceptuando el calor y el oxígeno) que puede ser controlado e incluso manejado por el hombre (Rodríguez-Trejo *et al.*, 2020).

Los combustibles forestales son elementos críticos en muchas de las actividades de planificación y gestión de incendios forestales (Keane y Wagtendonk, 2001). Estos permiten evaluar diversos factores como el riesgo, peligro, intensidad y frecuencia, vinculados a la presencia de incendios forestales en un determinado ecosistema (Flores-Garnica *et al.*, 2018). La necesidad de aplicar medidas preventivas y manejar el material combustible acumulado en cualquier tipo de ecosistema conduce a la realización de inventarios de combustibles forestales (Madrigal *et al.*, 2017). La caracterización y cuantificación de los combustibles forestales es un aspecto de fundamental importancia para la predicción del comportamiento del fuego, la evaluación de sus efectos ecológicos y la toma de decisiones de manejo (Flores-Garnica *et al.*, 2018; Quiroga-Palacio y Santiago Villa, 2019; Rodríguez *et al.*, 2024), sin embargo, existe incertidumbre sobre la precisión de las técnicas de estimación del material combustible en cualquier ecosistema forestal.

Los estudios relacionados con los incendios forestales y las actividades operativas actuales tienen un desafío común en la cuantificación de los combustibles, ya que la carga de combustible varía en todo el ecosistema (Chen *et al.*, 2017). Algunos inventarios de combustibles utilizan un número limitado de líneas de intersección ocasionando sesgos o tendencias lejanas a la realidad, mientras que en otros inventarios se puede sobreestimar la información cuando el número de línea se excede a lo necesario, incrementando con ello los esfuerzos de campo y desgastando recursos que quizá no sean necesarios. Es por ello que el presente trabajo intenta definir el número de sitios o líneas de intersección planar que sea representativo para muestrear la superficie de una hectárea en cuatro zonas de bosque de *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. del municipio de Motozintla de Mendoza, con el menor porcentaje de error posible y que indique con mayor precisión la cantidad promedio de combustibles presentes en esa porción de terreno. Con esto, la contribución al estado del conocimiento está encaminada a sentar las bases técnicas y metodológicas sobre el número adecuado de líneas de intersección planar que se debe aplicar en futuros inventarios de combustibles, tomando en cuenta que se tendrá un menor porcentaje de error posible. De esta manera, el objetivo del presente estudio es determinar la carga de combustibles forestales en cuatro bosques de *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. del municipio de Motozintla de Mendoza, Chiapas, aplicando diferentes esquemas de muestreo para definir el número de líneas que permita mayor precisión y rigor estadístico, al momento de ubicar las zonas potenciales a incendios forestales. Para ello, se plantean las hipótesis: i) no se presentan diferencias en cuanto al número de líneas adecuado para la determinación de la carga de combustibles leñosos y hojarasca y ii) la carga de combustibles forestales y hojarasca no muestran diferencias significativas en los cuatro sitios evaluados.

2. Materiales y Métodos

Área de estudio.

El estudio se realizó en el municipio de Motozintla de Mendoza (15° 22. N y 92° 15. W), ubicado a una altitud de 1300 msnm en el sureste del estado de Chiapas dentro de la región Sierra Madre de Chiapas, México. Los climas predominantes en Motozintla de Mendoza son los climas cálidos húmedos con abundantes lluvias en verano (Am), cálidos subhúmedos con lluvias en verano A(wl) y templados-húmedos con abundantes lluvias en verano C(m). El rango de precipitación media anual es de 1000 a 4500 mm, mientras que la temperatura que prevalece es de 12 a 26 °C (CONAGUA, 2011). Se seleccionaron para el presente estudio las zonas de pinares localizadas al noreste del polígono del municipio, específicamente un bosque de *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl.

Diseño de muestreo.

Se establecieron cuatro sitios del bosque de *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. con características homogéneas (rodales) distribuidas de norte a sur: sitio 1 (15°21'51" N, 92°16'38", 1493 msnm) sitio 2 (15°21'49" N, 92°16'37", 1530 msnm), sitio 3 (15°21'47" N, 92°19'35", 1572 msnm) y sitio 4 (15°21'49" N, 92°19'32", 1608 msnm). En cada sitio, se delimitó una superficie de 1 ha⁻¹ orientada con respecto al norte geográfico, permitiendo con ello mayores facilidades en las actividades de medición y ubicación de los transectos lineales dentro de cada parcela experimental. Utilizando un muestreo sistemático, en cada sitio se ubicaron un total de ocho transectos estableciendo cinco líneas de 20 m por cada transecto, con una separación entre líneas de 10 m siguiendo un rumbo franco al norte. En total se obtuvieron 40 líneas en cada sitio, haciendo un total de 160 líneas en toda el área muestreada, estas cubren perfectamente un área de estudio total de 40,000 m², que corresponde a 10,000 m² para cada sitio. Los criterios para delimitar el área de estudio consisten en mantener todos los atributos de densidad, mezcla de especies, altura y diámetro dominantes que el resto del rodal.

Método

Para estimar la carga de combustibles forestales se utilizó la técnica de intersecciones planares, descrita por Brown (1974) y adaptada por Sánchez y Zerecero (1983). De acuerdo con la técnica de intersecciones planares, la medición de los combustibles leñosos representa el corte virtual de un plano vertical sobre los materiales, representado por la línea de muestreo y que en el terreno se delimitó extendiendo una cuerda de 20 m seccionada a 1, 4, 10 y 20 m. Las partículas leñosas que fueran intersecadas en la línea cuya clase diamétrica son de 0 a 0.6 cm (combustibles de 1 h) y de 0.6 a 2.5 cm (combustibles de 10 h) se registraron en el primer metro de la línea, las partículas con clase diamétrica de 2.5 a 7.5 cm (combustibles de 100 h) se midieron en los primeros cuatro metros de la línea y finalmente en el total de la línea de intersección planar se midieron las partículas leñosas con diámetros mayores a 7.5 cm que corresponden a los combustibles de 1000 h (Figura 1).

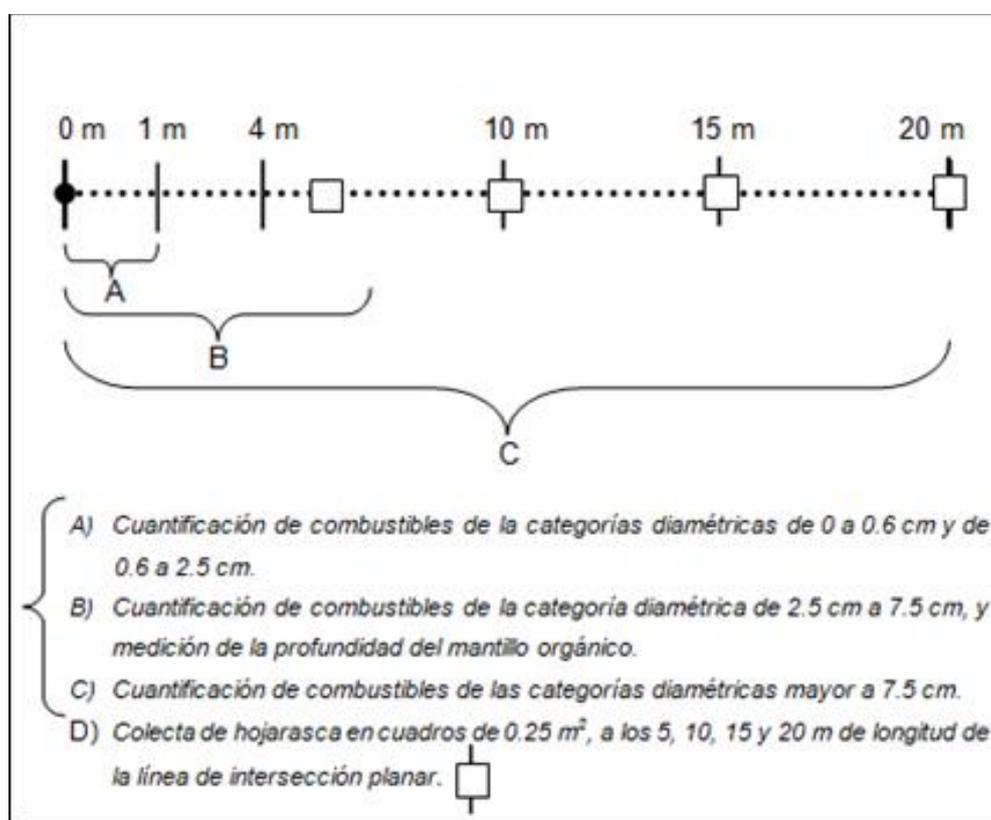


Figura 1. División de las líneas de muestreo establecidas en cada uno de los cuatro sitios de estudio para la caracterización y cuantificación de combustibles forestales.

Variables medidas

a) Caracterización del arbolado. En cada sitio establecido, se midieron las variables dasométricas: altura, diámetro normal, densidad de arbolado, área basal y otros índices reportados en otro estudio.

b) Combustibles leñosos. Los combustibles finos con diámetro menor a 2.5 cm (0 a 0.6 cm y 0.6 a 2.5 cm) y medianos (de 2.5 a 7.5 cm) se contabilizaron utilizando un calibrador hecho de cartón que funciona como un vernier con las dimensiones estándar de cada categoría de combustibles finos y medianos. Por su parte, los combustibles de con diámetro >7.5 cm (firme y podrido) se consideraron a lo largo de los 15 metros, es decir en toda la línea de muestreo. La cuantificación de esta categoría de combustibles se realizó midiendo el diámetro de la troza interceptada por la línea de muestreo, mediante el uso del flexómetro. El registro se realizó midiendo ramas o trozas con diámetros mayores a 7.5

cm que no presentaran pudriciones (firme), separando de las que si presentaran algún grado de putrefacción. Los diámetros obtenidos se elevaron al cuadrado y se realizó la sumatoria parcial de diámetros por línea de muestreo, posteriormente, se realizó la sumatoria total para cada sitio de muestreo.

La cuantificación total de combustibles se realizó mediante la suma de los promedios de cada categoría diamétrica de combustibles. Para poder efectuar los cálculos de cada categoría diamétrica o tamaño de clase, se emplearon las fórmulas descritas por Sánchez y Zerecero (1983), tal y como se muestra en el cuadro 1.

Cuadro 1. Modelos matemáticos empleados para el cálculo de la carga de combustibles forestales (Brown, 1974).

Clase de combustible (diámetro en cm)	Fórmula
0 – 0.6	$P = (0.484 * f * c) / (N * l)$
0.6 – 2.5	$P = (3.369 * f * c) / (N * l)$
2.5 – 7.5	$P = (36.808 * f * c) / (N * l)$
> 7.5 (sin pudrición)	$P = (1.46 * d^2 * c) / (N * l)$
> 7.5 (con pudrición)	$P = (1.21 * d^2 * c) / (N * l)$

Donde: P = Peso de los combustibles, expresado en toneladas/hectáreas (t/ha); f = Frecuencia o número de intersecciones; c = Factor de corrección de pendiente del terreno; d2 = Suma de los cuadrados de los diámetros de las ramas y trozas > a 7.5; N = Número de líneas; l = Longitud total de la línea de muestreo o suma de las longitudes de las líneas dado en pies lineales. (1 m = 3.28 pies) (2 m = 6.56 pies) (4 m = 13.12 pies) (7 m = 22.96 pies)

Dado a que la topografía de los sitios de estudio es irregular, se aplicó un factor de corrección de la pendiente, refiriendo esta a una base horizontal. Para ello se utilizó la siguiente fórmula:

$$C = \frac{1 + (\% \text{ pendiente})^2}{100}$$

b) Combustibles de hojarasca. La cuantificación de hojarasca superficial y en fermentación incluye todo el material acumulado por caída natural de los diferentes estratos vegetales del área estudiada, principalmente está conformada por acículas de pino de las especies más representativas de la zona. En los cuadros de 0.25 m² se evaluó la profundidad del mantillo con el uso de un flexómetro, midiendo el perfil de las capas orgánicas, desde la superficie hasta el límite con el suelo mineral. Esta medición se efectuó a los 5, 10, 15 y 20 m de longitud de cada línea de muestreo. De todas las líneas de muestreo ubicadas en cada sitio, se obtuvieron las profundidades promedio. Para la cuantificación de mantillo orgánico, se tomó en cuenta el valor de la profundidad de hojarasca y humus en todas las líneas de muestreo, haciendo una correlación entre profundidad promedio y peso seco de la hojarasca para cada sitio establecido. La hojarasca se midió en función a su peso en t ha⁻¹. Las colectas realizadas en campo con bolsas de polietileno fueron llevadas a laboratorio para someterlas a secado con una estufa a temperatura de 105°C durante 24 horas. El promedio del peso seco de la hojarasca se multiplica por el peso total del material colectado en el metro cuadrado. Los datos obtenidos se extrapolaron para referirlos a una hectárea y así obtener la cantidad de hojarasca existente en t ha⁻¹.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos al utilizar los esquemas de muestreo de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 y 40 líneas de muestreo por hectárea fueron procesados para calcular la media y desviación estándar por cada esquema, adicionalmente se estimó el error de muestreo considerando una confiabilidad del 95%. La selección de los mejores esquemas de muestreo se basó en los que menores desviaciones estándar y error de muestreo exhibieron. Posteriormente,

se realizó el ANOVA y comparación de medias por Tukey-Kramer para determinar diferencias significativas entre los sitios evaluados para cada una de las variables definidas.

3. Resultados

Caracterización arbórea

En el sitio 1 se encontraron 302 árboles de los cuales 207 correspondieron a *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. y los 95 árboles restantes fueron de *Pinus maximinoi* H. E. Moore. El diámetro promedio del rodal corresponde a 34 cm, una altura de 16 m y un área basal de 18.9 m² correspondiendo un aporte promedio de combustibles forestales por árbol de 0.172 toneladas. En el sitio 2 se encontraron 249 árboles, de los cuales 134 árboles son de *Pinus oocarpa* y 115 árboles

restantes de *Pinus maximinoi*. El diámetro promedio del rodal fue de 31 cm, con altura media de 19.5 m y un área basal de 17.3 m², teniendo que cada árbol aporta un promedio de 0.193 toneladas de biomasa. Para el caso del sitio 3, se encontraron 274 árboles de los cuales 260 correspondieron a *Pinus oocarpa* y los 14 árboles restantes fueron de *Pinus* sp. y *Quercus* sp. El diámetro promedio del rodal corresponde a 36.5 cm, una altura de 19.6 m y un área basal de 21.5 m². El aporte promedio de combustibles forestales por árbol en este sitio fue de 0.205 toneladas. Finalmente, en el sitio 4 el número total de árboles encontrados fue de 315, de los cuales 240 árboles fueron de *Pinus oocarpa*, 32 árboles de *Pinus maximinoi* y 43 árboles de *Pinus* sp. El diámetro promedio del rodal corresponde a 24 cm, con altura promedio de 14.6 m y un área basal de 13.9 m², con ello el aporte de combustibles forestales de cada árbol corresponde a 0.130 toneladas.

Combustibles forestales leñosos

La carga total de combustibles forestales leñosos mostró el valor mínimo de 41.22 t ha⁻¹ de combustibles correspondiente al sitio 2, mientras que el valor máximo encontrado pertenece al sitio 3 fue de 56.44 t ha⁻¹, utilizando de 5 a 40 líneas de muestreo por hectárea dentro de los cuatro sitios de estudio (Cuadro 2).

Cuadro 2. Esquemas de muestreo para estimar la carga total de combustibles forestales en los cuatro sitios evaluados.

No. Líneas ha ⁻¹	Carga media (t ha ⁻¹)	D.E (t ha ⁻¹)	Error de muestreo (%)
<i>Sitio 1</i>			
5	51.86	4.2	187
10	53.06	3.52	111
15	52.96	3.33	86
20	53.34	3.35	75
25	53.02	3.13	62
30	52.43	3.2	58
35	52.18	3.08	52
40	52.11	2.94	46
<i>Sitio 2</i>			
5	47.62	1.16	51
10	48.21	1.48	46
15	42.99	2.49	56
20	42.45	2.7	54
25	42.02	3.01	55
30	41.55	3.03	51
35	41.22	3.07	48
40	46.73	2.24	46
<i>Sitio 3</i>			
5	52.95	4.47	169
10	52.27	5.86	155
15	54.03	5.88	125
20	55.07	5.91	102
25	55.55	5.54	80
30	55.74	5.22	65
35	56.3	5.07	46
40	56.44	5	39
<i>Sitio 4</i>			
5	45.12	1.82	81
10	44.57	2.32	73
15	43.57	2.53	65
20	42.99	2.49	56
25	42.45	2.7	54

30	42.02	3.01	55
35	41.55	3.03	51
40	41.22	3.07	48

Para el caso de los sitios 1, 3 y 4, se observó que el menor error de muestreo y desviación estándar se obtuvo al utilizar el muestreo con las 40 líneas por hectárea. En estas 40 líneas el sitio 1 muestra una media de 52.11 t ha⁻¹ de combustibles forestales con una desviación estándar de 2.94 y un error de muestreo del 46 %, el sitio 4 presenta una media de 41.22 t ha⁻¹ de combustibles forestales, desviación estándar de 3.07 con un error de muestreo de 48% y el sitio 3 presenta una media de 56.44 t ha⁻¹ con desviación estándar de 5 y error de muestreo correspondiente al 39% (Cuadro 2). El sitio 2 presenta un menor error de muestreo y desviación estándar con el esquema de muestreo de 10 líneas, obteniendo un promedio de 48.21 t ha⁻¹ de combustibles forestales, con una desviación estándar correspondiente a 1.48 y un error de muestreo del 46% (semejante al del sitio 1).

El análisis de varianza muestra que existen diferencias significativas en la carga promedio de combustibles totales para las 40 líneas establecidas dentro de los sitios de estudio (Figura 2).

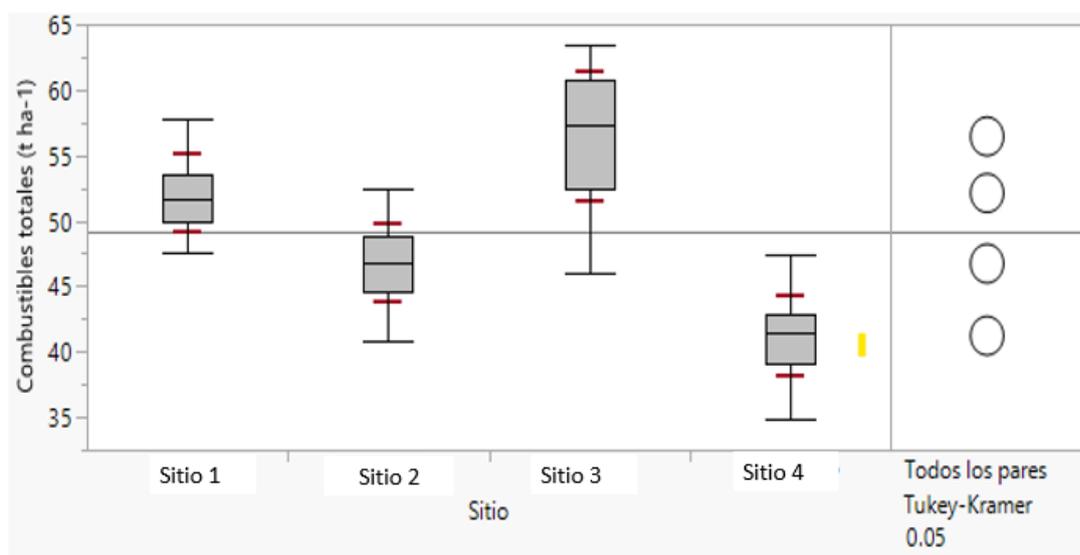


Figura 2. Diagrama de cajas que muestra la comparación de la carga de combustibles totales en los cuatro sitios evaluados (carga media + Desv. Std).

En el cuadro 3 se presentan los valores promedio obtenidos del total de combustibles forestales, el valor más alto corresponde al sitio 3 con una carga promedio de 56.44 ± 5.01 t ha⁻¹, mientras que la carga más baja se encontró en el sitio 4 con un promedio de 41.22 ± 3.07 t ha⁻¹.

Cuadro 3. Valores promedio de la carga de combustibles totales obtenidos en cada sitio evaluado ± su desviación estándar (Desv. Std.). Letras diferentes indican diferencias significativas (prueba de Tukey-Kramer, P<0.05).

Sitio	No. de Líneas	Carga Media	Desv. Std	Error de muestreo (%)	Suma de Cuadrados	Estadístico F _{3/156}	valor P
Sitio 1	40	52.11 b	2.94	46.5	5226.13	134.12	<0.0001
Sitio 2	40	46.73 c	2.97	47			
Sitio 3	40	56.44 a	5.01	79			
Sitio 4	40	41.22 d	3.07	48.5			

Combustibles forestales de hojarasca

La cuantificación de los combustibles conformados principalmente por acículas de *Pinus* sp., mostraron 7.65 t ha⁻¹ como valor mínimo en el sitio 2 y el valor máximo encontrado en el sitio 1 que corresponde a 19.79 t ha⁻¹ utilizando desde 5 a 40 líneas de muestreo por hectárea de los cuatro sitios evaluados (Cuadro 4).

Cuadro 4. Esquemas de muestreo para estimar la carga total de combustibles leñosos en los cuatro sitios evaluados.

No. Líneas ha ⁻¹	Carga media (t ha ⁻¹)	D.E (t ha ⁻¹)	Error de muestreo (%)
<i>Sitio 1</i>			
5	16.59	4.22	189
10	18.12	3.41	107
15	18.43	3	77
20	18.93	2.79	62
25	19.32	2.77	55
30	19.57	2.62	47
35	19.79	2.52	42
40	19.71	2.47	39
<i>Sitio 2</i>			
5	14.6	2.11	94
10	14.32	1.66	52
15	14.35	1.54	40
20	7.95	1.17	23
25	7.84	1.3	24
30	7.73	1.27	21
35	7.65	1.35	21
40	13.42	2.24	35
<i>Sitio 3</i>			
5	15.37	2.75	123
10	15.81	2.77	87
15	14.86	3.39	87
20	15.16	3.3	73
25	15.29	3.04	61
30	15.44	2.93	53
35	15.49	2.79	47
40	15.55	2.73	43
<i>Sitio 4</i>			
5	9.08	0.83	37
10	8.79	0.85	27
15	8.4	1	25
20	8.27	1.02	23
25	7.95	1.17	23
30	7.84	1.3	24
35	7.75	1.29	21
40	7.67	1.35	21

En el sitio 2 al utilizar el esquema de muestreo con 30 líneas por hectárea, se obtuvo un promedio de combustibles de hojarasca de 7.73 t ha⁻¹ con una desviación estándar de 1.27 t ha⁻¹ y un error de muestreo del 21%, los cuales resultaron ser los más bajos respecto a los demás esquemas de muestreo. Para el caso del sitio 4, el esquema de muestreo más adecuado resultó ser el de 35 líneas por hectárea, para el cual se obtuvo un promedio de combustibles de hojarasca de

7.75 t ha⁻¹ con una desviación estándar de 1.29 t ha⁻¹ y un error de muestro del 21%. En los sitios 1 y 3, se observó que el menor error de muestro y desviación estándar se obtuvo utilizando las 40 líneas por hectárea. En estas 40 líneas, el sitio 1 muestra un promedio de 19.71 t ha⁻¹ de combustibles de hojarasca con una desviación estándar de 2.47 y un error de muestro del 39 %, mientras que el sitio 3 presenta una media de 15.55 t ha⁻¹ con desviación estándar de 2.73 y error de muestro correspondiente al 43% como se observa en el cuadro 4.

El análisis de varianza muestra que existen diferencias significativas en la carga promedio de combustibles de hojarasca entre los sitios evaluados, teniendo mayor acumulación en el sitio 1 y la carga de combustibles más baja en el sitio 4 (Figura 3).

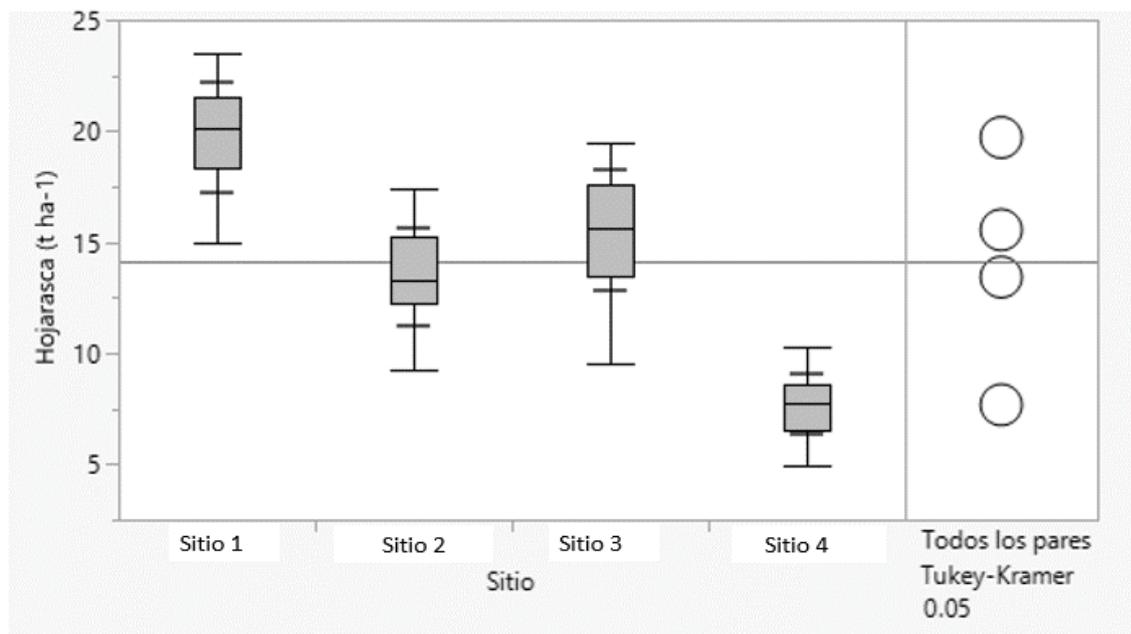


Figura 3. Diagrama de cajas que muestra la comparación de la carga de combustibles de hojarasca en los cuatro sitios evaluados (carga media + Desv. Std).

En el cuadro 5 se presentan los valores promedio obtenidos del total de combustibles forestales, el valor más alto corresponde al sitio 1 con una carga promedio de 19.71 ± 2.47 t ha⁻¹, mientras que la carga más baja se encontró en el sitio 4 con un promedio de 7.67 ± 1.35 t ha⁻¹.

Cuadro 5. Esquemas de muestro para estimar la carga total de combustibles de hojarasca en los cuatro sitios evaluados.

Sitio	No. de Líneas	Carga Media	Desv. Std	Error de muestro (%)	Suma de Cuadrados	Estadístico F _{3/156}	valor P
Sitio 1	40	19.71 a	2.47	39.1	3025.82	196.66	<0.0001
Sitio 2	40	13.42 c	2.24	35.4			
Sitio 3	40	15.55 b	2.72	43.1			
Sitio 4	40	7.67 d	1.35	21.3			

4. Discusión

Los resultados obtenidos en la presente investigación permiten rechazar la hipótesis que señala que no se presentan diferencias en el número de líneas adecuado para la determinación de la carga de combustibles leñosos y hojarasca, dado a que se presentan diferencias en el error de muestro, el cual disminuye a medida que incrementa el número de líneas que se emplean en cada sitio (a excepción del sitio 2 en la evaluación de hojarasca donde el empleo de 30 o 35 líneas de intersección planar resulta más viable que el uso de 40 líneas).

Los resultados encontrados en este estudio son imprescindibles y denotan un primer esfuerzo para entender el rigor estadístico al momento de realizar el inventario de combustibles forestales, evitando con ello errores de muestreo que se reflejen en resultados atípicos. Sin duda, la técnica de levantamiento más utilizada para los combustibles muertos es la de intersecciones planares in situ, descrita por Brown et al. (1982) y aplicada recientemente por diversos autores (Rodríguez-Trejo et al., 2020; Ruiz-Corzo et al., 2022; Aguilar-Herrera, 2023; Barrios-Calderón et al., 2024), mediante la cual se estima su volumen por procedimientos rápidos y sencillos, con posibilidad de utilizarse en cualquier tipo de bosque (Bautista et al., 2005). La finalidad de conocer el número adecuado de líneas de intersección planar en un sitio de muestreo se deriva de la necesidad de reducir esfuerzos de campo en los inventarios de combustibles forestales. En el presente estudio se ha comprendido la variabilidad que puede existir entre un sitio y otro, por ello, el número de líneas de intersección planar a utilizar también deberá ser acorde a las condiciones de cada sitio evaluado y las variables dasométricas influyentes en su productividad (López-López et al., 2024).

La estimación de la carga de combustibles y las técnicas para su adecuado manejo, constituyen una herramienta de prevención de incendios que ha cobrado importancia en México y algunos países (Hyde et al., 2011; Flores-Garnica, 2021). Existen diversos estudios orientados a la cuantificación de combustibles forestales a nivel internacional como el de Mota (2005) en Brasil donde establece modelos de combustibles forestales. En Estados Unidos, Flores (2001) realizó el "Modeling the spatial variability of forest fuel arrays", donde con el uso de técnicas geoestadísticas diseña un modelo de variabilidad espacial de combustibles forestales, partiendo de un inventario en campo. Los trabajos de evaluación de combustibles forestales como los de Warren y Olsen (1964), Van Wagner (1968) y Brown (1971, 1974), han sido la base para los realizados en nuestro país.

En México, recientemente se han aplicado diferentes estrategias de muestreo que permitan eficientizar el cálculo de la carga de combustibles, empleando métodos estadísticos que permitan delimitar el tamaño del sitio y número adecuado de líneas de intersección, para la evaluación de material leñoso caído y hojarasca (Bautista et al., 2005, Morfín et al., 2007, Chávez Durán, 2016). Diversos estudios como el de Nájera y Hernández (2006) realizado en El Salto Durango es un antecedente importante en cuanto a la metodología a aplicar en esta investigación, obteniendo que el número de líneas adecuado para estimar la carga de combustibles leñosos fue de 25 líneas. A partir de ahí, ya es posible definir el número de líneas a establecer en todas las zonas a evaluar en ese tipo de bosques templados. Si bien es cierto, que el número de líneas y sitios de muestreo, dependerá de la estructura y composición arbóreas (López-López et al., 2024), Calleja-Peláez (2020) asevera que los estudios de combustibles forestales no toman en cuenta un criterio estadístico para definir el tamaño de la muestra, no obstante, esta investigación aplicada a un bosque templado monoespecífico de *Pinus oocarpa* denota un criterio estadístico que considera un mayor número de líneas de intersección planar, lo cual permite que la precisión en los cálculos aumenten, mientras que el error de muestreo disminuye.

5. Conclusiones

De manera general, el uso de 40 líneas de muestreo por hectárea garantiza mayor precisión en el muestreo de combustibles forestales. Es por ello que, a medida que se siga incrementando el número de líneas por hectárea, el error de muestreo tiende a reducirse en los sitios y clases de combustibles que mostraron mayor precisión con este número de líneas de intersección planar.

6. Agradecimientos

A la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Chiapas por brindar las facilidades y el apoyo en la logística y realización de este proyecto que forma parte de la tesis de titulación de la primera autora.

7. Conflictos de interés:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés y se han seguido todos los procedimientos éticos y requisitos necesarios.

Referencias

1. Aguilar Herrera, J. A. (2023). Caracterización de los combustibles forestales aéreos y comportamiento potencial del fuego en una plantación de *Callitropsis lusitanica* (Mill.) DP Little (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma Chapingo). <https://repositorio.chapingo.edu.mx/items/1d62bafb-0646-412d-a6ed-d79e9dce1403>
2. Barrios-Calderón, R. J., Infante-Mata, D., Flores-Garnica, J. G., Tovilla-Hernández, C., Grimaldi-Calderón, S. J. and García Alfaro, J. R. 2018. Woody fuel load in coastal wetlands of the La Encrucijada Biosphere Reserve, Chiapas, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 24(3), 339-357. doi: 10.5154/r.rchscfa.2017.12.068
3. Barrios-Calderón, R. J., Infante Mata, D., Flores Garnica, J. G., Torres, J. R. Forest Fuel Bed Variation in Tropical Coastal Freshwater Forested Wetlands Disturbed by Fire. *Forests* 2024, 15, 158. doi: 10.3390/f15010158
4. Bautista, J., Treviño, E., Nívar, Aguirre, C. y Cantú, S. (2005). Caracterización de combustibles leñosos en el ejido Pueblo Nuevo, Durango. *Chapingo, serie ciencias forestales y ambiente*. 11 (001): 51-56. Recuperado de: <https://www.re-dalyc.org/articulo.oa?id=62911108>
5. Brown, J. K. (1971). A planar intersects method for sampling fuel volume and surface area. *Forest Science* 17, 96-102. doi: 10.1093/forestscience/17.1.96
6. Brown, J. K. (1974). Handbook for Inventorying Downed Woody Material; General Technical Report INT – 16; USDA Forest Service: Heber City, UT, USA, 1974; p. 24. Available online: <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/28647>
7. Calleja Peláez, B., López López, B., Méndez González, J., Ríos Camey, J. M. y 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. doi: 10.29298/rmcf.v11i57.617
8. Chávez, D. Á., Xelhuantzi, C. J., Rubio, C. E., Villanueva, D. J., Flores, L. H. y de la Mora, O. C. 2016. Caracterización de cargas de combustibles forestales para el manejo de reservorios de carbono y la contribución al cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13, 2589–2600. doi: 10.29312/remexca.v0i13.485.
9. Chen, Y., Zhu, X., Yebra, M., Harris, S., Tapper, N. (2017). Development of a predictive model for estimating forest surface fuel load in Australian eucalypt forests with LiDAR data, *Environmental Modelling & Software*, 97, 61-71. doi: 10.1016/j.envsoft.2017.07.007.
10. CONAGUA (2011). Atlas del agua en México 2011. México, DF: Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
11. Flores-Garnica, J. G. (2021). Antecedentes y perspectivas de la investigación en incendios forestales en el INIFAP. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(spe), 91-119. doi: 10.29298/rmcf.v12iEspecial-1.981
12. Flores-Garnica, J. G., Wong-González, J. C. y Paz-Pellat, F. (2018). Camas de combustibles forestales y carbono en México. *Madera y bosques*, 24(spe), e2401893. doi: 10.21829/myb.2018.2401893
13. Hyde, J. C., Smith, A. M. S., Ottmar, R. D., Alvarado, E. C. and Morgan, P. (2011). The combustion of sound and rotten coarse woody debris: a review. *International Journal of Wildland Fire*, 20, 163–174. doi: 10.1071/IWF09113
14. Keane, R. E., Burgan, R. and Van Wagtenonk, J. (2001). Mapping wildland fuels for fire management across multiple scales: Integrating remote sensing, GIS, and biophysical modeling. *International Journal of Wildland Fire*. 10: 301-319. doi: 10.1071/WF01028
15. López-López, B., Aguirre-Calderón, O. A., Jiménez-Pérez, J., González-Tagle, M. A., Alanís-Rodríguez, E. y 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). doi: 10.19136/era.a11n2.3957
16. Nájera, A. (2015). Evaluación, cuantificación y manejo de combustibles forestales en plantaciones forestales. Manual del participante. Proyecto de Manejo Integrado del Fuego. Ministerio de Medio Ambiente. Panamá. 43 p.
17. Nájera, J.A. y Hernández, L. J. (2006). Estimación de la carga de combustibles forestales en un bosque coetáneo de El Salto, Durango. Tesis de Ingeniería Forestal en Manejo Sustentable de Recursos naturales. ITES. pp. 2-4
18. Quiroga Palacio, M. E. y Santiago Villa, H. M. (2019). Manejo del fuego como alternativa frente a los incendios forestales. El caso del Parque Entrenubes. *Ambiente Y Desarrollo*, 23(45). doi: 10.11144/Javeriana.ayd23-45.mfaf
19. Rodríguez, M. P. R., Acosta, Y., Vilar, C. C., Toala, T. O. M. y González, A. J. (2024). Comportamiento del fuego en quemas controladas en tierras de vocación forestal en Sancán, Manabí, Ecuador. *Revista Cubana de Ciencias Forestales: CFORES*, 12(1), 7. Recuperado a partir de <https://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/831>
20. Rodríguez-Trejo, D. A., Martínez-Muñoz, P., Pulido-Luna, J. A., Martínez-Lara y P. J., Cruz-López, J. D. (2020) Combustibles, comportamiento del fuego y emisiones en un pastizal y una sabana artificiales en Chiapas, México. *Revista de Biología Tropical* 68: 641-654. doi: 10.15517/RBT.V68I2.33954
21. Ruiz-Corzo, R., Aryal, D. R., Venegas-Sandoval, A., Jerez-Ramírez, D. O., Fernández-Zúñiga, K. S., López-Cruz, S. del C., López-Hernández, J. C., Peña-Álvarez, B. y Velázquez-Sanabria, C. A. (2022). Dinámica temporal de combustibles forestales y efecto del incendio en Cerro Nambiyugua, Chiapas, México. *Ecosistemas Y Recursos Agropecuarios*, 9(2). doi: 10.19136/era.a9n2.3253
22. Sánchez, C. J., Zerocero, L. G. (1983). Método practico para calcular la cantidad de combustibles leñosos y hojarasca. Nota Divulgativa No 9 CIFONOR – INIF. México. 11 p.
23. Van Wagner, C. E. (1968). The line intersects method in forest fuel sampling. *For. Sci.* 14, 20-26.

24. Walker, X. J., Rogers, B. M., Veraverbeke, S., Johnstone, J. F., Baltzer, J. L., Barrett, K., Bourgeau-Chávez, L., Day, N. J., Groot, W. J., Dieleman, C. D., Goetz, S., Hoy, E., Jenkins, L. K., Kane, E. S., Parisien, M. A., Potter, S., Schuur, E. A. G., Turetsky, M., Whitman, E., Mack and M. C. (2020). Fuel availability not fire weather controls boreal wildfire severity and carbon emissions. *Nature Climate Change* 10: 1130-1136. doi: 10.1038/s41558-020-00920-8, 2020b
25. Warren, W.G. and Olsen, P.F. (1964). A Line Intersect Technique for Assessing Logging Waste. *Forest Science* 10, 267-276. doi:10.1093/forestscience/10.3.267

Disclaimer/Publisher's Note:

The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of SAV and/or the editor(s). SAV and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Citation: To be added by editorial staff during production.

Academic Editor: Firstname Lastname

Received: date

Revised: date

Accepted: date

Published: date31-05-2024



Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).