

## Aplicación y simulación de una quema prescrita en un bosque de encino-pino en Guerrero, México

### Application and simulation of a prescribed burn in an oak-pine forest in Guerrero, México

Bernardo López-López<sup>1\*</sup>, José Germán Flores-Garnica<sup>2</sup>, Oscar Alberto Aguirre-Calderon<sup>3</sup>,  
Marisa Silva-Aparicio<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Intercultural del Estado de Guerrero. Carretera Tlapa-Marquelia km. 54. CP. 41500. La Ciénega, Malinaltepec, Guerrero, México.

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Centro Altos de Jalisco, Av. Biodiversidad 2470, CP. 47600. Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México.

<sup>3</sup>Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales. Carretera Nacional km 145. CP. 67700. Linares, Nuevo León, México.

\*Autor de correspondencia: lopez\_020986@hotmail.com

#### Artículo científico

Recibido: 12 de septiembre 2023

Aceptado: 10 de enero 2024

**RESUMEN.** Los modelos de combustibles estandarizados son una herramienta útil para predecir el comportamiento del fuego y plantear estrategias de supresión de incendios forestales. El objetivo del presente trabajo fue comparar las simulaciones del comportamiento del fuego con el resultado de una quema prescrita en un bosque de encino-pino en Guerrero, México. Se colectaron muestras de hojarasca (Ho) y mantillo (Ma) en 0.09 m<sup>2</sup> al final de las líneas de intersección planar para el muestreo de combustibles leñosos. Las simulaciones en el sistema FUEGO se basaron en: a) cargas de combustible de campo y b) cargas teóricas de los modelos 8 y 9. Durante el desarrollo de la quema se monitoreó la temperatura (T), humedad relativa (HR), velocidad del viento (VV), altura de llama (ALL) y velocidad de propagación del fuego (VP). La carga de combustible 11 t ha<sup>-1</sup>, propició una VP = 1.07 m min<sup>-1</sup> y ALL = 0.65 m para quemas en contra de la pendiente. Las simulaciones con un cuadrado medio del error (CME) de 0.11, evidenciaron valores aceptables de ALL (0.54 y 0.64 m) a excepción del modelo ALL-M8 con 0.24 m (p < 0.05). La VP-real no presentó diferencias estadísticas con las simulaciones para valores de 0.40 y 1.78 m con un CME = 0.54 y 1.56, los modelos VP-9 y VP-M9 propiciaron valores de simulación altos, respecto a la VP-M8 (p < 0.05). El comportamiento del fuego respondió a los cambios de HR, VV y distribución espacial de los combustibles en el terreno.

**Palabras clave:** Altura de llama, velocidad del viento, cicatriz del fuste, modelos de combustible.

**ABSTRACT.** Standardized fuel models are a useful tool to predict fire behavior and propose forest fire suppression strategies. The aim was to compare the simulations of fire behavior with the result of a prescribed burn in an oak-pine forest in Guerrero, Mexico. Leaf litter (Ho), and mulch (Ma) samples were collected in 0.09 m<sup>2</sup> at the end of the planar intersection lines for woody fuel sampling. The simulations in the FUEGO system were based on: a) field fuel loads, and b) theoretical loads of models 8 and 9. During the development of the burning, the temperature (T), relative humidity (HR), speed of the wind (VV), flame height (ALL) and fire spread speed (VP). The fuel load of 11 t ha<sup>-1</sup> led to a PV = 1.07 m min<sup>-1</sup> and ALL = 0.65 m for burning against the slope. The simulations with a mean square error (CME) of 0.11 showed acceptable values of ALL (0.54 and 0.64 m) except for the ALL-M8 model with 0.24 m (p < 0.05). The VP-real did not present statistical differences with the simulations for values of 0.40 and 1.78 m with a CME = 0.54 and 1.56, the VP-9 and VP-M9 models provided high simulation values compared to the VP-M8 (p < 0.05). Fire behavior responded to changes in HR, VV and spatial distribution of fuels in the field.

**Keywords:** Flame height, wind speed, stem scar, fuel models.

**Como citar:** López-López B, Flores-Garnica JG, Aguirre-Calderon OA, Silva-Aparicio M (2024) Aplicación y simulación de una quema prescrita en un bosque de encino-pino en Guerrero, México. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 11(1): e3890. DOI: 10.19136/era.a11n1.3890.

## INTRODUCCIÓN

Un modelo de combustibles es una descripción estandarizada de las propiedades de los combustibles forestales (Karouni *et al.* 2014). Es importante tomar en cuenta que los modelos se apoyan con información de varios factores, como el material combustible (vegetación), topografía y clima (Fujioka *et al.* 2008). Las ventajas de determinar el comportamiento potencial del fuego, antes de la implementación de una quema prescrita se concretan en: a) valorar los riesgos y control que se pueda tener y b) determinar la severidad del fuego en los ecosistemas forestales.

La practicidad de los modelos de combustible implica estimar con cierta precisión si el fuego en un incendio forestal o quema prescrita tiene un comportamiento moderado y es factible promover su uso (Flores-Garnica 2021) en los ecosistemas forestales. Algunos estudios han evaluado el efecto de las quemas prescritas en la regeneración natural (Díaz-Hernández *et al.* 2020), supervivencia y mortalidad de los árboles (López-Moctezuma *et al.* 2015, Vera-Vilchis y Rodríguez-Trejo 2007) y la reducción de cargas de combustible (Rodríguez-Trejo *et al.* 2018, Rodríguez-Trejo *et al.* 2020), entre otros.

En México las quemas prescritas y quemas controladas están consideradas dentro de la NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA-2007 que establece los lineamientos técnicos de métodos de uso del fuego en terrenos forestales (SEMARNAT 2009). A nivel nacional el uso de quemas prescritas es muy heterogéneo con zonas donde su uso es más extendido y regiones donde no se practican (Pérez-Salicrup *et al.* 2018). Se han realizado esfuerzos interinstitucionales para evaluar y documentar el comportamiento del fuego en diferentes ecosistemas del país. Para bosque de pino con resto de aprovechamiento se confiaron VP de 2.4 km h<sup>-1</sup> y ALL de 2.9 m (Pérez-Salicrup *et al.* 2018), en bosque de encino Rodríguez-Trejo *et al.* (2018) registraron VP de 0.59 y 3.63 m min<sup>-1</sup> para quemas en contra y a favor de la pendiente, mientras López-Moctezuma *et al.* (2015) indicaron VP = 20 m min<sup>-1</sup> y ALL = 3 m en quemas a favor de la pendiente y viento.

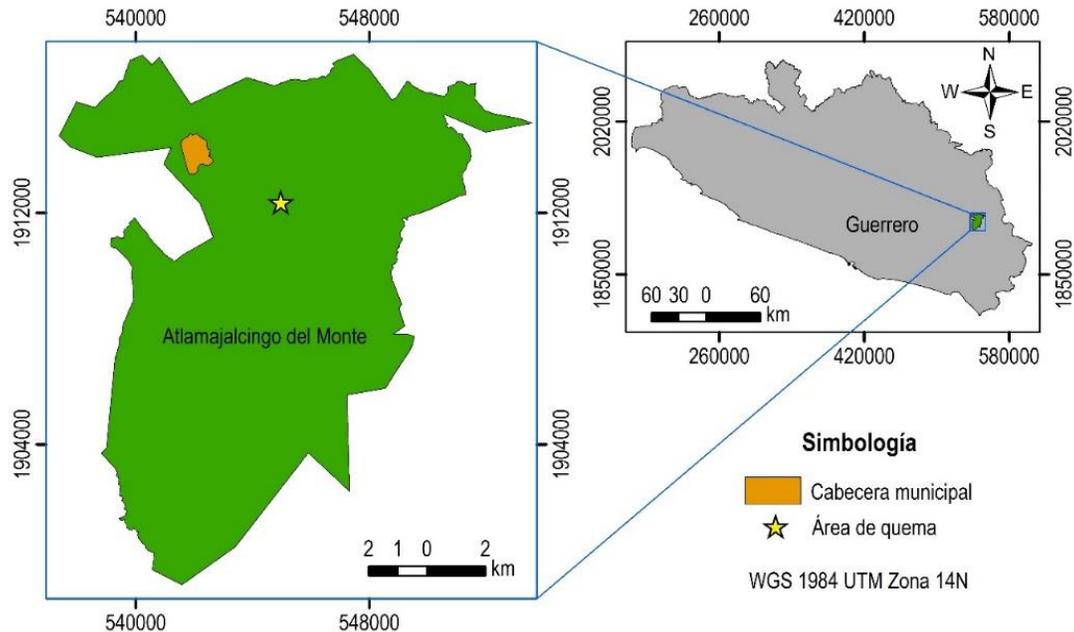
Se ha documentado el efecto de las quemas prescritas en plantaciones de *Pinus pinaster* Aiton (Fernandes 2009), *P. elliotii* Engelm. (Batista *et al.* 2013) y *Tectona grandis* L. (Ramos-Rodríguez *et al.* 2018, Ramos-Rodríguez *et al.* 2019). En México Flores-Garnica (2023) simuló la velocidad de propagación del fuego con los modelos 2, 8 y 9 de Anderson (1982) para bosque de pino-encino, los resultados obtenidos indicaron que dichos modelos no fueron adecuados para las condiciones de quema prescrita realizada ( $r = 0.31$  a  $0.61$ ;  $p > 0.05$ ).

La información sobre esta temática aún es insuficiente para descartar la practicidad de los modelos de combustible a las condiciones de clima y tipo de vegetación en México, incluido el bosque de encino-pino. Ante tal panorama el objetivo del presente trabajo fue comparar las simulaciones del comportamiento del fuego con el resultado de una quema prescrita en un bosque de encino-pino en Guerrero, México.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

La quema prescrita se llevó a cabo en una parcela de 700 m<sup>2</sup> en la comunidad Plan de Guadalupe, Atlamajalcingo del Monte, Guerrero, en las coordenadas 17° 17' 46" LN y 98° 34' 36" LW (Figura 1).



**Figura 1.** Ubicación del área de quema prescrita en la comunidad Plan de Guadalupe, Atlamajalcingo del Monte en Guerrero, México.

El clima del área corresponde a templado subhúmedo C(w2)(w), con temperatura media anual de 12 a 18 °C y precipitación media anual de 1 200 mm (INEGI 2006, 2007 y 2008).

### Medición de variables dasométricas y cicatriz del fuste

En toda la parcela de 700 m<sup>2</sup> se midió el diámetro de los árboles con una cinta diamétrica 283D/5m y altura con un clinómetro Haglöf EC IID en árboles con diámetro mayor o igual a 2.5 cm. La cicatriz del fuste se midió inmediatamente después de la liquidación total del fuego con un flexómetro Truper T-3ME. Las especies dominantes en el área de quema fueron *Quercus crassifolia* Humboldt, *Q. magnoliifolia* Née y *Pinus teocote* Schltdl. et. Cham.

### Evaluación de combustibles forestales

La evaluación de combustibles leñosos se realizó acorde a la técnica de intercepciones planares (Brown 1974), la cual clasifica los combustibles por tiempo de retardo, es decir, el tiempo que tardan los combustibles en perder dos terceras partes de su contenido de humedad y alcanzar el equilibrio con la humedad del ambiente. De esta forma, se establecieron sitios de muestreo estructurados en tres líneas de 10 m orientados a 0, 120 y 240° de azimut entre líneas, los materiales de 1 h se contabilizaron a 2 m, 10 h a 4 m y 100 h a 10 m. El peso total de los combustibles de 1 h se integró con los siguientes elementos: ramillas de hasta 0.6 cm, hojarasca, zacates y herbáceas (NWCG 2023). Para estimar el peso de los componentes leñosos por tiempo de retardo se retomó la fórmula ajustada de Bonilla-Padilla *et al.* (2012) para encinos, dada la mayor presencia de especies pertenecientes al género *Quercus* (Tabla 1).

**Tabla 1.** Fórmulas para calcular el peso de combustibles leñosos (Brown, 1974) de un área quemada prescrita en bosque de encino-pino en la comunidad Plan de Guadalupe, Atlamajalcingo del Monte en Guerrero, México.

Tiempo de retardo (h)	Tamaño (cm)	Fórmula ajustada para encinos
1	0-0.6	$P = \left( \frac{0.484 * f * c}{N * L} \right) * 2.01$
10	0.61-2.5	$P = \left( \frac{3.369 * f * c}{N * l} \right) * 2.01$
100	2.51-7.5	$P = \left( \frac{36.808 * f * c}{N * l} \right) * 1.675$

P: Peso de los combustibles (t ha<sup>-1</sup>). F: Frecuencia o número de intersecciones. c: Factor de corrección por pendiente del terreno. N: Número de líneas. l: Longitud de las líneas de muestreo (dada en pies lineales [ft]: 1 m = 3.28 ft).

Para estimar el peso de la hojarasca (Ho) y mantillo ([Ma] capa de hojarasca en proceso de descomposición), se colectaron muestras al final de cada línea de intersección planar (0.09 m<sup>2</sup>), que fueron secados en estufa a 70 °C para obtener su peso seco. El peso seco se extrapola a t ha<sup>-1</sup> con la siguiente fórmula (Calleja-Peláez *et al.* 2020):

$$C = PS * 0.1111$$

Donde: C = Carga de hojarasca y mantillo (t ha<sup>-1</sup>); PS = Peso seco hojarasca y mantillo (g) en 0.09 m<sup>2</sup> (30 x 30 cm); y 0.1111 = Factor de conversión de (g) en 0.09 m<sup>2</sup> a t ha<sup>-1</sup>.

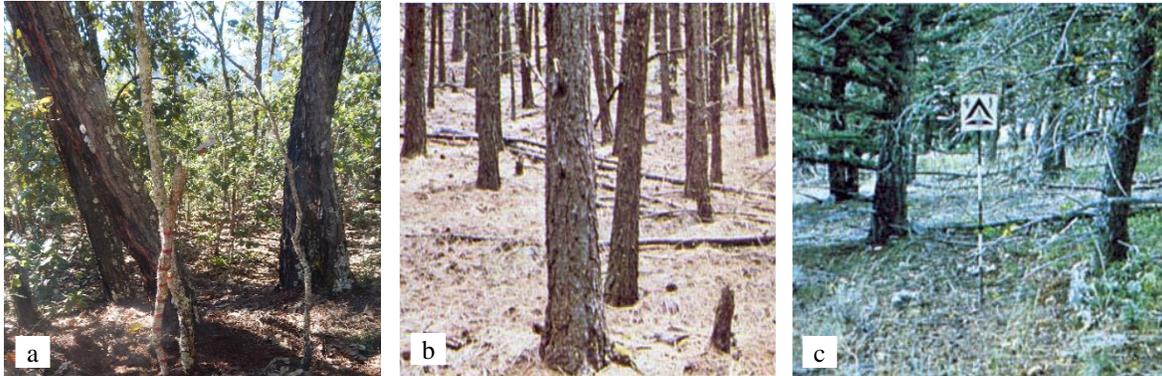
### Selección de modelos de combustible

Con base en las evaluaciones de campo, se seleccionaron los modelos de combustible similares a las condiciones del rodal, considerando cambios temporales de la humedad del combustible (%) y la velocidad del viento (km h<sup>-1</sup>). Los resultados del comportamiento del fuego se analizaron y compararon para definir el mejor ajuste; los modelos de combustibles seleccionados fueron los propuestos por Anderson (1982); la elección se hizo a través de fotografías con condiciones forestales similares a las del área de trabajo.

El uso de fotografías para designar modelos de combustible ha sido ampliamente aplicado, lo cual ha derivado en el concepto de fotoseries, que consta de un catálogo de fotografías para clasificar visualmente un área forestal con los modelos de combustible pertinente (Scholl y Waldrop 1999, Flores-Garnica *et al.* 2010, Labenski *et al.* 2022); bajo dicha premisa se seleccionó el modelo 8 = residuos de bosque cerrado y modelo 9 = residuos de arbolado de madera dura (Figura 2).

### Humedad de combustibles

La simulación de comportamiento del fuego requiere que se conozca el contenido de humedad (CH) de los combustibles forestales, para los combustibles de 1 y 10 h se determinó con base a la humedad relativa (HR), usando los siguientes modelos (Flores-Garnica y Gómez-Murillo 2011):  $CH_{1h} = (0.1334 * HR) + 1.3129$  y  $CH_{10h} = (0.1755 * HR) + 1.1135$  con valores de R<sup>2</sup> = 0.95 y 0.97 respectivamente.



**Figura 2.** a) Condición forestal del área de estudio. Modelos de combustible seleccionados: b) modelo 8 y c) modelo 9.

A partir del resultado de los modelos anteriores se estimó el contenido de humedad para el combustible de 100 h con la siguiente ecuación (Flores-Garnica y Gómez-Murillo 2011):

$$CH_{100h} = \frac{CH_{10h}}{CH_{1h}} (CH_{10h})$$

El calor de combustión (CC) se determinó con base al contenido de humedad de los combustibles donde a mayor humedad se requiere mayor calor de combustión y se determinó con la siguiente formula:

$$CC (BTU lb^{-1}) = 250 + (1116 * (\frac{M}{100}))$$

Donde: M= Humedad de los combustibles (%).

### Procesos de simulación

Las simulaciones del comportamiento del fuego se enfocaron en la estimación de la VP y ALL utilizando el sistema FUEGO (Flores-Garnica 2023), la propagación de incendios superficiales se estimó con base a la siguiente fórmula (Andrews 2018):

$$ROS = \frac{RI * PFR * (1 + WC + SF)}{BD * EQIG * QIG}$$

Donde: ROS = Tasa de propagación (chains h<sup>-1</sup>), RI = Intensidad de reacción, PFR = Relación de flujo de propagación, WC = Coeficiente del viento, SF = Factor de pendiente (factor de pendiente y/o viento), BD = Densidad aparente (lbs ft<sup>3</sup>), EQIG = Número de calentamiento efectivo, QIG = Calor de pre-encendido (BTU lb<sup>-1</sup>).

Las simulaciones se hicieron en contra de la pendiente (30%) y constante de contenido de calor a las partículas de combustible H = 8000 BTU lb<sup>-1</sup> (Scott y Burgan 2005), con lo que se desarrollaron una serie de gráficas que muestran la tendencia del comportamiento del fuego bajo diferentes modelos y condiciones ambientales. Las simulaciones se hicieron bajo dos perspectivas: a) con valores de carga de combustible estándar que corresponden a cada uno de los modelos de combustible M8 y M9; y b) con los mismos modelos, pero sustituyendo las cargas de combustible evaluadas en campo en los modelos 8 y 9 (Tabla 2). Se calculó el promedio de VP y ALL con los

valores resultantes de la simulación bajo diferentes cargas de combustible, la selección de la mejor opción se definió con base a menor CME.

**Tabla 2.** Comparación de medias de cargas de combustible ( $t\ ha^{-1}$ ) registradas en campo según la prueba de Tukey y valor de los modelos de combustible 8 y 9 de Anderson (1982).

Combustible	Estadístico de valores en campo			Modelos	
	n	$\bar{x}$	CV (%)	8	9
1 h	6	9.07 b	32.52	3.71	7.21
10 h	6	1.30 a	68.46	2.47	1.01
100 h	6	0.63 a	158.73	6.17	0.37
Total	18	11.0	32.18	12.35	8.59

n: Tamaño de muestra.  $\bar{x}$ : Media. CV: Coeficiente de variación.

### Implementación de la quema prescrita

La quema se llevó a cabo el 7 de diciembre de 2018 en una parcela de 20 x 35 m ( $700\ m^2$ ), orientada en dirección noroeste y perpendicular a la pendiente del terreno. El fuego se implementó bajo la técnica de quema en retroceso, el cual consistió en hacer que el fuego se propague en dirección opuesta a la pendiente (SEMARNAT 2009), es una técnica de ignición segura y fácil de dominar. Durante la quema se registró la temperatura (T [ $^{\circ}C$ ]), Humedad relativa (HR [%]) y VV ( $km\ h^{-1}$ ) cada 10 minutos, con una estación meteorológica portátil Kestrel 3000 (Tabla 3). La quema inició a las 9:27 y concluyó a las 10:07 h con una duración de 40 minutos; durante ese tiempo se monitorearon las siguientes variables: a) la velocidad de propagación (VP [ $m\ min^{-1}$ ]), la cual se evaluó como el tiempo que tardó el fuego en recorrer cinco m de distancia (Rodríguez-Trejo *et al.* 2020); b) altura de llama (ALL [m]), se midió con una vara graduada cada 10 cm con altura de 1 m, las marcas se instalaron a cada 5 m al frente de la quema.

**Tabla 3.** Variación de las condiciones ambientales, contenido de humedad de combustibles y pendiente durante el desarrollo de una quema prescrita en la comunidad Plan de Guadalupe, Atlamajalcingo del Monte en Guerrero, México.

Hora	HR (%)	T ( $^{\circ}C$ )	VV ( $km\ h^{-1}$ )	1 h (%)	10 h (%)	100 h (%)	P (%)
09:24	62.1	17.3	6.48	9.60	12.01	15.03	30
09:34	64.8	18.9	9.36	9.96	12.49	15.66	30
09:44	61.2	17.4	10.08	9.48	11.85	14.83	30
09:54	80.5	26.8	3.6	12.05	15.24	19.28	30
10:04	72.8	21.7	5.76	11.02	13.89	17.50	30
10:14	73.6	22.9	9.36	11.13	14.03	17.68	30
$\bar{x}$	70.6	20.8	7.44	10.54	13.25	16.66	30

$\bar{x}$ : Media. HR: Humedad relativa, T: Temperatura. VV: Velocidad del viento. P: Pendiente.

## Análisis estadístico

Una vez asumido el supuesto de normalidad de los datos con la prueba de Shapiro-Wilk (Shapiro y Wilk 1965), se procedió a realizar el análisis de varianza (ANOVA,  $p < 0.05$ ) para detectar diferencias entre las cargas de combustibles por tiempo de retardo (1, 10 y 100 h) y la comparación de media de las simulaciones con ALL (ALL-real, ALL-8, ALL-9, ALL-M8 y ALL-M9) y VP (VP-real, VP-8, VP-9, VP-M8 y VP-M9). Con la prueba de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ) se confirmaron las diferencias para un tratamiento dado. Todos los análisis se realizaron en el software IBM SPSS statistics versión 20 (SPSS, 2011).

## RESULTADOS

### Caracterización dasométrica y cargas de combustible

Las características del arbolado del área de estudio corresponden a un diámetro de  $10.56 \pm 10.35$  cm, altura de  $8.97 \pm 7.44$  m, densidad de 1 286 y 71 árboles  $ha^{-1}$  de *Quercus* y *Pinus* respectivamente, el fuego de la quema prescrita dejó una cicatriz en el fuste de 0.35 m. El ANOVA mostro diferencia entre cargas de combustible por componente ( $F = 38.31$ ,  $p < 0.001$ ), la mayor carga corresponde a los combustibles de 1 h ( $9.07 t ha^{-1}$ ) según la prueba de Tukey (Tabla 2). La carga total de combustibles con  $11 t ha^{-1}$  está en el rango de  $8.59$  y  $12.35 t ha^{-1}$  considerada en los modelos 8 y 9 (Tabla 2).

### Variables ambientales y comportamiento del fuego

Se registró una temperatura media de  $20.8$  °C, humedad relativa de 70.6% y velocidad del viento de  $7.44 km h^{-1}$ ; la temperatura máxima ( $26.8$  °C) se registró a las 9:24 h, coincidiendo con una velocidad del viento bajo de  $3.6 km h^{-1}$  y humedad relativa alta de 80.5% (Tabla 3).

La pendiente media del terreno en el área de quema fue del 30%, con valores de altura de llama moderada de 0.65 m y velocidad de propagación del fuego bajo de  $1.07 m min^{-1}$  (Tabla 4).

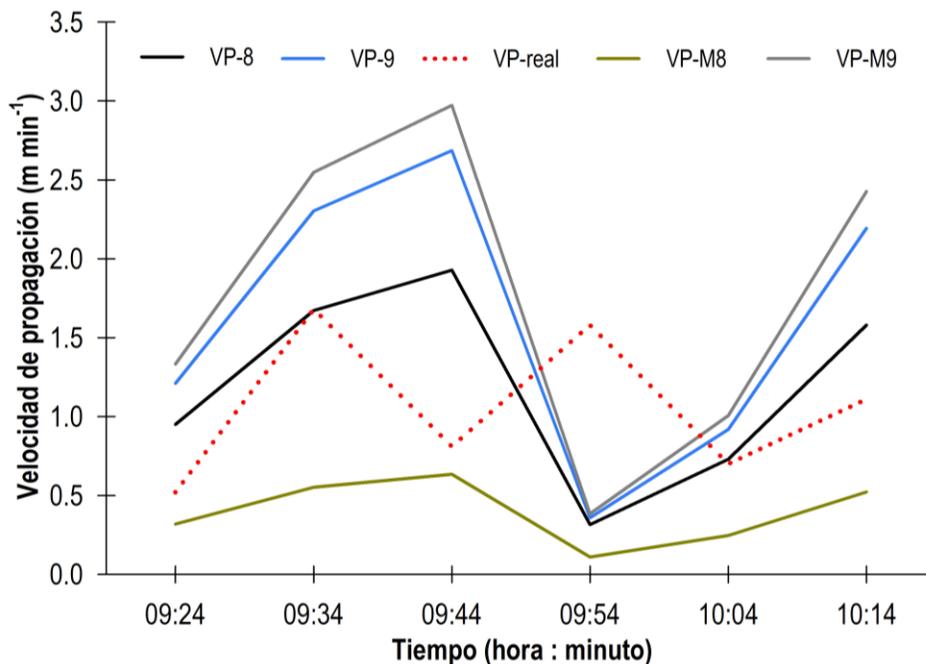
**Tabla 4.** Comparación de medias según la prueba de Tukey de las variables de comportamiento del fuego y valores del criterio del cuadrado medio del error resultante de los modelos de simulación.

Modelos	VP ( $m min^{-1}$ )		ALL (m)	
	$\bar{x}$	CME	$\bar{x}$	CME
real	$1.07 \pm 0.48$ ab	-	$0.65 \pm 0.2$ b	-
M8	$0.40 \pm 20$ a	0.68	$0.24 \pm 0.1$ a	0.22
M9	$1.78 \pm 1.02$ b	1.56	$0.64 \pm 0.2$ b	0.11
8	$1.20 \pm 0.63$ ab	0.54	$0.55 \pm 0.2$ ab	0.11
9	$1.61 \pm 0.91$ b	1.18	$0.54 \pm 0.2$ ab	0.11

$\bar{x}$ : Media. CME: Cuadrado medio del error. VP: Velocidad de propagación del fuego.  
ALL: Altura de llama.

### Simulación de la velocidad de propagación

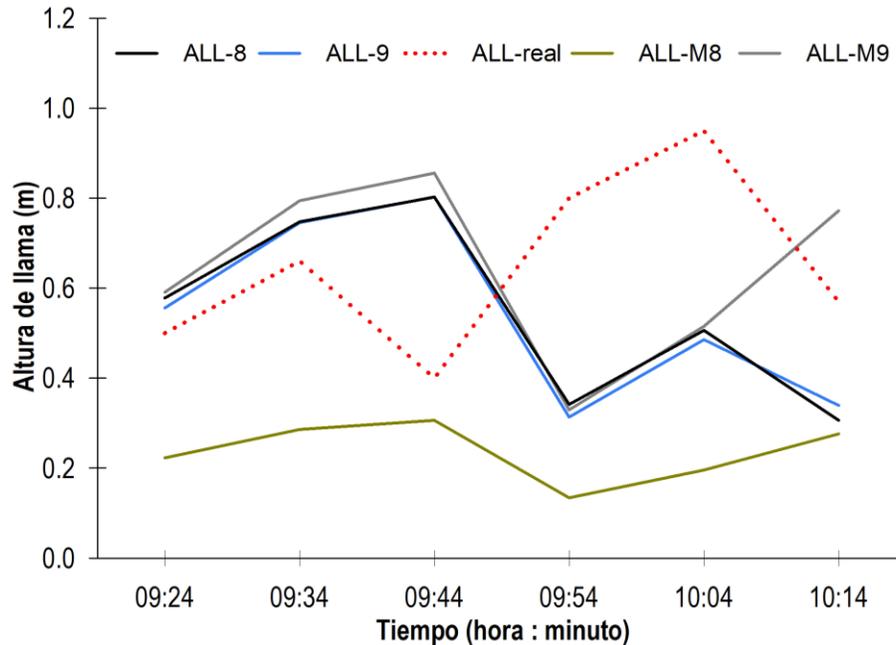
La VP-real de 1.07 m resultó estadísticamente igual a los cuatro modelos de simulación, aunque el modelo VP-8 con una media de VP = 1.20 m evidencio el CME más bajo de 0.54 (Figura 3 y Tabla 4). Los modelos de simulación VP-9 y VP-M9 con valores de 1.61 y 1.78 m resultaron estadísticamente diferente a la VP-M8 con una media de 0.40 m (Figura 3 y Tabla 4). A excepción del modelo VP-M8 que subestimo la ALL en todo el proceso de simulación, el resto de los modelos tendieron a sobreestimar el comportamiento del fuego al inicio de la quema, sin embargo a las 9.54 h los modelos subestimaron el comportamiento del fuego en respuesta a un incremento de la T y HR junto con un decremento de la VV (Figura 3 y Tabla 4).



**Figura 3.** Simulación de la velocidad de propagación con cargas de combustible registradas en campo (VP-8 y VP-9) y carga teórica de los modelos 8 y 9 (VP-M8 y VP-M9).

### Simulación de altura de llama

Los modelos de ALL-8, ALL-9 y ALL-M9 demostraron un comportamiento similar en todo el proceso de simulación, con un CME = 0.11 para valores de ALL 0.54 a 0.64 m, y resultaron estadísticamente iguales a la ALL-real de 0.65 m (Figura 4 y Tabla 4). El modelo ALL-M8 subestimo la ALL en todo el proceso de simulación, con una media de 0.24 m (CME = 0.22) y resultó estadísticamente diferente a la ALL-real (Figura 4 y Tabla 4). Las simulaciones de ALL evidenciaron un comportamiento muy similar a la VP donde el modelo ALL-M8 subestimo la ALL en todo el proceso de simulación. El resto de los modelos tendieron a sobreestimar el comportamiento del fuego al inicio de la quema, aunque a las 9:54 y 10:04 h los modelos subestimaron el comportamiento del fuego en respuesta a un incremento de la HR y decremento de la VV (Figura 4 y Tabla 4).



**Figura 4.** Simulación de altura de llama con cargas de combustible obtenidas en campo (ALL-8 y ALL-9) y carga teórica de los modelos 8 y 9 (ALL-M8 y ALL-M9).

## DISCUSIÓN

El rodal del área de quema se ubicó en la categoría de latizal con diámetros de 5 a 20 cm y altura menor a los 20 m (Grosse 2009), la densidad de 1 357 árboles  $\text{ha}^{-1}$  fue superior a los 838 árboles  $\text{ha}^{-1}$  registrado en bosque de pino-encino por Flores-Garnica *et al.* (2011). La cicatriz del fuste fue similar a los 0.36 m en quemas a favor de la pendiente (Rodríguez-Trejo *et al.* 2018) y resultó menor a los 0.5 y 9 m reportado por López-Moctezuma *et al.* (2015) y en ninguno de los casos representó un riesgo de mortalidad al arbolado. El combustible de 1 h presentó mayor carga con 9.07  $\text{t ha}^{-1}$  (82.46%), mientras los de 10 y 100 h solamente aportaron 1.93  $\text{t ha}^{-1}$  (17.54%), dichas cargas de combustible propiciaron la ocurrencia de una quema superficial que de acuerdo a Anaya-Morales y Rodríguez-Sosa (2017) es de cargas de combustible menor o igual a 30  $\text{t ha}^{-1}$  implican un índice de peligro de incendios muy bajo.

La T fue similar a los 21.8 °C en quema para plantaciones de *Pinus elliottii* (Batista *et al.* 2013) y menor a los 29.9 °C registrado en plantaciones de *Tectona grandis* L. F. (Ramos-Rodríguez *et al.* 2019). La HR fue menor en época de estiaje con valores de 24 y 33% (López-Moctezuma *et al.* 2015), mientras Ramos-Rodríguez *et al.* (2019) documentaron 63.75% que está dentro del rango de 61.2 a 80.8% registrado en la presente investigación. La VV estuvo en el rango de 7 a 8  $\text{km h}^{-1}$  (López-Moctezuma *et al.* 2015, Rodríguez-Trejo *et al.* 2018) y por arriba de los 0.9 a 6  $\text{km h}^{-1}$  registrado en otras investigaciones (Fernández 2009, Flores-Garnica *et al.* 2010, Batista *et al.* 2013). Es importante considerar que cada quema es diferente, incluso cuando ocurre en el mismo lugar, por ello se esperan diferentes comportamientos del fuego, debido a variaciones espaciales y temporales en las variables ambientales durante el desarrollo de una quema (Ruíz-González 2009).

La ALL fue similar a los 0.72 y 0.75 m reportados por Rodríguez-Trejo *et al.* 2018 y Urrutia-Hernández *et al.* 2020 en quemas contra la pendiente y viento. La variación de ALL fue baja respecto a los 0.5 a 3 m registrado por López-Moctezuma *et al.* (2015) en quemas a favor de la pendiente y viento para bosque de encino y 1.8 m para quema controlada en bosque de miombo (Quissindo 2018).

Los resultados confirman que a mayor pendiente se reduce significativamente la VP y operativamente se alcanza un mejor control en quemas contra la pendiente. La VP no sobrepasó los 3.12 m min<sup>-1</sup> registrado en bosques de *Pinus tropicalis* Morelet y *P. hartwegii* Lindl., para quemas de baja intensidad (Martínez-Becerra *et al.* 2004, Islas-Madrid *et al.* 2013), la quema se consideró segura y sin riesgo de que se saliera de control. El avance del fuego no lo determinan las condiciones promedio del combustible, sino que avanza hacia donde se tiene menos resistencia a la combustión, lo que implica que se propague donde se tienen los combustibles más finos y secos (Cruz y Fernández 2008).

El resultado de los modelos coinciden con White *et al.* (2014) quienes registraron VP (0.1 y 1.4 m min<sup>-1</sup>) y ALL (0.1 y 1.2 m) al simular con cargas de combustible (11.31 t ha<sup>-1</sup>) y VV (4.5 km h<sup>-1</sup>) en una plantación de *Eucaliptus*. Otros estudios evidenciaron diferente respuesta de comportamiento del fuego en campo con las simulaciones en el sistema BehavePlus (Fernandes 2009) y los modelos 2, 8 y 9 de Anderson (Flores-Garnica 2023). Los modelos de combustible representan una aproximación de la condición de los combustibles en campo (Scott y Burgan 2005, Cruz y Fernández 2008) y asumen condiciones uniformes de tiempo y espacio (Andrews 2014), lo que puede conllevar a una representación deficiente del comportamiento del fuego (Tricone y Anderson 2018).

## CONCLUSIONES

Los modelos de combustible seleccionados fueron apropiados para simular el comportamiento del fuego al comparar los resultados con valores registrados en campo. Los modelos VP-8 y ALL-M9 evidenciaron mejor respuesta a las simulaciones, por consiguiente se recomienda su uso en condiciones similares de cargas de combustible para quemas en contra de la pendiente. El comportamiento del fuego respondió a los cambios de HR y VV durante el desarrollo de la quema prescrita.

## AGRADECIMIENTOS

Al Sr. Irineo Villegas Viada propietario del terreno donde se llevó a cabo la quema prescrita. Al CONAHCYT por el apoyo al trabajo de campo a través del proyecto: "Fomento a la Investigación Forestal en Estudiantes de Licenciatura" a través del Programa de Fomento a las Vocaciones Científicas en las y los Niños y Jóvenes Mexicanos 2018 que estuvo a cargo del primer autor.

## CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

## LITERATURA CITADA

- Anaya-Morales JA, Rodríguez-Sosa JL (2017) Acciones para la prevención de incendios forestales en cinco rodales del Lote 7 perteneciente a la Unidad Empresarial de Base Silvícola Guisa. *Revista Cubana de Ciencias Forestales* 5(2): 181-193.
- Anderson HE (1982) Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. USDA Forest Service general technical report INT - Intermountain Forest and Range Experiment Station, 122. Ogden, US. 22p.
- Andrews PL (2018) The Rothermel surface fire spread model and associated developments: A comprehensive explanation. General Technical Report. RMRS-GTR-371. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Fort Collins, Colorado, US. 121p.
- Andrews PL (2014) Current status and future needs of the BehavePlus fire modeling system. *International Journal of Wildland Fire* 23: 21-33.
- Batista AC, Beutling A, Pereira JF (2013) Fire behavior evaluation in experimental fires on forest fuels of *Pinus elliottii* plantations. *Revista Árvore* 37(5): 779-787.
- 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, US. 24p.
- 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>.
- Cruz MG, Fernandes PM (2008) Development of fuel models for fire behaviour prediction in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) stands. *International Journal of Wildland Fire* 17(2): 194-204. <https://doi.org/10.1071/WF07009>.
- Díaz-Hernández D, Rodríguez-Laguna R, Rodríguez-Trejo DA, Acevedo-Sandoval A, Maycotte-Morales CC (2021) Dinámica de la regeneración de *Pinus montezumae* posterior a un incendio ya quema prescrita. *Botanical Sciences* 99(1): 58-66. <https://doi.org/10.17129/botsci.2634>.
- Grosse WH (2009) Silvicultura del bosque nativo chileno. Función histórica y opciones futuras sobre la base de manejo sustentable. INFOR. Santiago de Chile. 136p.
- Fernandes PM (2009) Examining fuel treatment longevity through experimental and simulated surface fire behaviour: a maritime pine case study. *Canadian Journal of Forest Research* 39:2529-2535.
- Flores-Garnica JG, Xelhuantzi-Carmona J, Chávez-Duran ÁA (2010) Monitoreo del comportamiento del fuego en una quema controlada en un rodal de pino-encino. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 16(1): 49-59. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2009.05.017>.
- Flores-Garnica JG, Rosas-Aceves OG, Ortega-Minakata AT, Rodríguez-Chávez OG, Chávez-Duran ÁA, Xelhuantzi-Carmona J (2011) Monitoreo del comportamiento del fuego en quemas prescritas. Campo Experimental Centro Altos de Jalisco, CIRPAC, INIFAP. Folleto Técnico No. 3. Tepatitlán, Jalisco. México. 69p.
- Flores-Garnica JG, Gómez-Murillo LP (2011) Estimación práctica de la variabilidad de la humedad de combustibles bajo diferentes ecosistemas forestales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(5): 45-57. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v2i5.583>.
- Flores-Garnica JG (2021) Antecedentes y perspectivas de la investigación en incendios forestales en el INIFAP. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 12 (Especial-1): 92-119. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12iEspecial-1.981>.
- Flores-Garnica JG (2023) Simulación de las variaciones de la velocidad de propagación del fuego, durante una quema prescrita. *e-CUCBA* 19: 45-55. <https://doi.org/10.32870/ecucba.vi19.262>.

- Fujioka FM, Gill AM, Viegas DX, Wotton M (2008) Fire danger and fire behavior modeling systems in Australia, Europe, and North America. *Developments in Environmental Science* 8: 471-497.
- 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.
- Islas-Madrid GE, Rodríguez-Trejo DA, Martínez-Hernández PA (2013) Diversidad del sotobosque y radiación solar en un bosque de *Pinus hartwegii* Lindl. con quema prescrita. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 4(15): 25-40.
- Karouni A, Daya B, Bahlak S, Chauvet P (2014) A simplified mathematical model for fire spread predictions in wildland fires combining between the models of Anderson and Rothermel. *International Journal of Modeling and Optimization* 4(3): 197-200. <https://doi.org/10.7763/IJMO.2014.V4.372>
- Labenski P, Ewald M, Schmidlein S, Ewald FF (2022) Classifying surface fuel types based on forest stand photographs and satellite time series using deep learning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 109: 1-17.
- 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.
- Martínez-Becerra LW, Ramos-Rodríguez MP, Castillo-Martínez I, Bonilla-Vichot M, Sotolongo-Sospedra R (2004) Efectos de quemas prescritas sobre las propiedades del suelo en bosques de *Pinus tropicalis* Morelet, en Cuba. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 10(1): 31-35.
- NWCG (2022) Glossary. National Wildfire Coordinating Group. <https://www.nwcg.gov/term/glossary/one-hour-timelag-fuels>. Fecha de consulta: 15 de febrero de 2022.
- Pérez-Saliciprup DR, Ortiz-Mendoza R, Garduño-Mendoza E, Martínez-Torres HL, Ocegüera-Salazar KA, Quintero-Gradilla S, Castillo-Navarro F, Alvarado-Celestino E, González-Cabán A (2018) Coordinación institucional para la realización de quemas prescritas y quemas controladas en México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9(49): 253-270. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i49.169>.
- Quissindo IAB (2018) Estimación del comportamiento del fuego en quemada controlada en la hacienda experimental de Ngongoinga (Huambo, Angola). *Revista Digital de Medio Ambiente "Ojeando la Agenda"* 54: 60-76.
- Ramos-Rodríguez MP, Albán-Ventura DO, Jiménez-González A, Mero-Jalca OF, Ganchozo-Quimis MT (2018) Planificación de una quema prescrita en una plantación de *Tectona grandis* Linn F. *Revista Cubana de Ciencias Forestales* 6(2): 184-194.
- Ramos-Rodríguez MP, Pico-Coronel OG, Jiménez-González A, Cantos-Cevallos CG, Tapia-Zúñiga MV, Mero-Jalca OF (2019) Comportamiento del fuego a escala experimental en una plantación de *Tectona grandis* L.f. en Jipijapa, Manabí, Ecuador. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias* 14(1): 1-9. <https://doi.org/10.5039/agraria.v14i1a5607>.
- Rodríguez-Trejo DA, Martínez-Muñoz P, Pulido-Luna JA, Martínez-Lara PJ, Cruz-López JD (2020) Combustibles, comportamiento del fuego y emisiones en un pastizal y una sábana artificiales en Chiapas, México. *Revista de Biología Tropical* 68(2): 641-654. <https://doi.org/10.15517/rbt.v68i2.33954>.
- 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.
- Ruíz-González AD (2009) Introducción al comportamiento del fuego. *Recursos Rurales* 5: 15-19.
- SEMARNAT (2009) Norma Oficial Mexicana NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA-2007, que establece las especificaciones técnicas de métodos de uso del fuego en los terrenos forestales y en los terrenos de uso agropecuario. *Diario Oficial de la Federación*. 16 de enero de 2009. México.

- <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3331/1/nom-015-semarnat-sagarpa-2007.pdf>. Fecha de consulta: 31 de diciembre de 2023.
- Shapiro SS, Wilk MB (1965) An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 52(3/4): 591-611.
- SPSS (2011) IBM SPSS Statistics for Windows. Version 20.0. IBM Corp. New York, USA.
- Scholl ER, Waldrop TA (1999) Photos for estimating fuel loadings before and after prescribed burning in upper coastal plain of the southeast. General Technical Report SRS-26. Southern Research Station. USDA Forest Service. Asheville, North Carolina, US. 25p.
- Scott JH, Burgan RE (2005) Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-153. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Fort Collins, Colorado, US. 72p.
- Tricone F, Anderson TR (2018) Guía para modelos de combustible de comportamiento de fuego en Ecosistemas Tropicales. Sarteneja, Belize. 31p.
- Urrutia-Hernández I, Rodríguez-Alfaro B, González-Menéndez M, Martínez-Becerra LW, Flores-Garnica JG, Alonso-Torrens Y (2020) Impacto de quemas prescritas en la estabilidad del escurrimiento superficial en un bosque de pino. *Madera y Bosques* 26(2): 1-12. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2621549>.
- Vera-Vilchis V, Rodríguez-Trejo DA (2007) Supervivencia e incremento en altura de *Pinus hartwegii* a dos años de quemas prescritas e incendios experimentales. *Agrociencia* 41(2): 219-230.
- White BLA, Ribeiro GT, Souza RM (2014) Caracterização do material combustível e simulação do comportamento do fogo em eucaliptais no litoral norte da Bahia, Brasil. *Revista Floresta* 44(1): 33-42.