



DOI: [10.29298/rmcf.v15i86.1485](https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i86.1485)

Artículo de investigación

Comportamiento del fuego y consumo de la capa de hojarasca en bosques de pino-oyamel y pino-encino

Fire behavior and litter layer consumption in pine-fir and pine-oak forests

Rubén Ortiz-Mendoza¹, Marco A. González-Tagle^{1*}, Diego R. Pérez-Salicrup², Oscar A. Aguirre-Calderón¹, Wibke Himmelsbach¹, Luis G. Cuéllar-Rodríguez¹

Fecha de recepción/Reception date: 17 de mayo de 2024.

Fecha de aceptación/Acceptance date: 11 de septiembre de 2024.

¹Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales. México.

²Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad. México.

*Autor para correspondencia; correo-e: marco.gonzaleztg@uanl.edu.mx

*Corresponding author; e-mail: marco.gonzaleztg@uanl.edu.mx

Resumen

La carga de combustibles, la topografía y la humedad del combustible influyen en el comportamiento del fuego. Conocer la relación de estos permite identificar el comportamiento del fuego según la comunidad arbórea, y si su heterogeneidad corresponde o no a diferentes camas de combustibles forestales, lo cual ayudará a definir la necesidad de establecer diferentes acciones de manejo de combustibles en función de la comunidad arbórea. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la propagación del fuego, la geometría de la flama y el consumo de la capa de hojarasca de pino-oyamel y pino-encino para definir, si corresponden a la misma cama de combustible. Se realizaron quemas en condiciones controladas de la capa de hojarasca en pendientes de 0°, 10° y 20°. Se observó diferente comportamiento del fuego entre las comunidades arbóreas ($p < 0.05$), pero sin variación en el consumo de combustibles. La velocidad de propagación, longitud y altura de la flama y el Índice del fuego aumentaron de acuerdo a la pendiente, mientras que el ángulo de separación de la flama se redujo. La carga de hojarasca se correlacionó positivamente con la altura y longitud de la flama e Índice del fuego en el bosque de pino-oyamel. Los modelos ajustados indicaron que la intensidad del fuego aumentó exponencialmente con la longitud de la flama y logísticamente en la propagación del fuego. El comportamiento heterogéneo del fuego entre las comunidades arbóreas sugiere que corresponden a diferentes camas de combustibles, con influencia significativa de la pendiente en el comportamiento del fuego.

Palabras clave: Cama de combustible, comunidad arbórea, incendio forestal, propagación del fuego, quema de acículas, Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.

Abstract

Fuel load, topography, and fuel moisture influence fire behavior. Knowing these relationships allows us to identify the fire behavior according to the tree community, and whether or not their heterogeneity corresponds to different forest fuel beds. This will help define the need to establish different fuel management actions depending on the tree community. This work aimed to evaluate the fire spread, flame geometry, and consumption of the pine-fir and pine-oak litter layers in order to determine whether they correspond to the same fuel bed. Controlled burning of the litter layer was carried out on slopes of 0°, 10°, and 20°. Different fire behaviors were observed among tree communities ($p < 0.05$) but without variation in fuel consumption. The propagation rate, flame length, flame height, and fire Index increased according to the slope, while the flame separation angle decreased. Litter load was positively correlated with flame height, flame length, and fire Index in pine-fir forest. Fitted models indicated that fire intensity increased exponentially with flame length and logistically with the fire spread. Heterogeneous fire behavior among tree communities suggests that they correspond to different fuel beds, with a significant influence of slope on fire behavior.

Keywords: Fuel bed, tree community, wildfire, fire spread, needle burning, Monarch Butterfly Biosphere Reserve

Introducción

Un incendio forestal es un fuego no estructural y sin control en un área con vegetación, originado por factores como descargas eléctricas, actividad volcánica, accidentes o causas antropogénicas (Miloua, 2019). Estos incendios impactan el ecosistema circundante (Matsypura *et al.*, 2018) con magnitudes según el régimen de incendios, la topografía, las condiciones atmosféricas y la adaptación de la vegetación al fuego (Francos *et al.*, 2018). A pesar de sus consecuencias adversas, el fuego es una parte integral del ecosistema, que genera efectos tanto negativos, como positivos en la flora y fauna (Matsypura *et al.*, 2018).

La interacción entre la topografía, el tiempo atmosférico y el combustible forestal tiene un papel crucial en el comportamiento de los incendios forestales (Cochrane, 2009). En particular, la capa de hojarasca, compuesta por una variedad de combustibles, ha captado la atención de los investigadores debido a su impacto en la propagación del fuego y el consumo de combustibles (Cruz *et al.*, 2013). Por lo que comprender los factores que influyen en ese proceso es esencial para desarrollar estrategias efectivas de manejo y extinción de incendios.

La complejidad de los elementos que determinan el comportamiento del fuego en la capa de hojarasca radica en sus características físicas, químicas y flamabilidad (Morgan *et al.*, 2015); las físicas influyen en la aireación de la capa de hojarasca (Kauf *et al.*, 2018); así como, de acuerdo a la variabilidad en la composición arbórea, en la existencia de diferentes camas de combustibles (CC), la creación de distintos escenarios para el comportamiento del fuego (Cornelissen *et al.*, 2017; Grootemaat *et al.*, 2017) y en el consumo de combustible.

El consumo de combustible depende del comportamiento del fuego y es un indicador de sus efectos; los primeros en consumirse corresponden a los combustibles ligeros (Fernandes y Loureiro, 2013), ya que requieren menos calor para su ignición (Cornelissen *et al.*, 2017).

El objetivo de esta investigación fue evaluar el comportamiento del fuego y el consumo de la capa de hojarasca compuesta de acículas, en dos comunidades arbóreas de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM), así como ajustar ecuaciones que expliquen el comportamiento del fuego e indiquen si las comunidades arbóreas corresponden a una misma CC. Se plantea la siguiente hipótesis: la capa de hojarasca de pino-encino y pino-oyamel tienen comportamientos del fuego y consumo de combustibles diferentes, lo cual indica que corresponden a CC diferentes. Además, se postula que la pendiente determina la propagación del fuego y su intensidad, a partir de que con el programa *Wildland-Urban interface Fire Dynamics Simulator* (WFDS, por sus siglas en inglés) se ha determinado que la pendiente influye en el comportamiento del fuego (Pérez-Ramírez *et al.*, 2017; Sánchez-Monroy *et al.*, 2019).

Este enfoque pretende contribuir a la comprensión detallada de las condiciones que afectan el comportamiento del fuego en la capa de hojarasca, con el fin de proporcionar recomendaciones específicas para el manejo adaptado a cada contexto; lo que proporcionará herramientas prácticas para la planificación y gestión efectiva del manejo de combustibles y la extinción de incendios forestales.

Materiales y Métodos

Diseño de la cama de combustibles

Se recolectaron, aleatoriamente, 36 muestras de 1 m² de la capa de hojarasca, compuestas de acículas de comunidades arbóreas de pino-oyamel [*Pinus* sp.-*Abies religiosa* (Kunth) Schlttdl. & Cham.] y pino-encino (*Pinus* sp.-*Quercus* sp.) de la RBMM. Las comunidades presentan una densidad de 284 y 412 árboles ha⁻¹, altura de 22.1 y 18.1 m (hipsómetro *Nikon*[®] modelo *Laser Forestry Pro*), diámetro normal de 37.6 y 27.6 cm (cinta diamétrica *Forestry Suppliers*[®] modelo 347D), diámetro de copa de 7.7 y 6.8 m (cinta métrica *Truper*[®] modelo TF50ME), respectivamente. Para cada muestra se midió el grosor de la capa de hojarasca usando una regla *Office Depot*[®] modelo F604 de 30 cm; posteriormente, se recolectó en una bolsa de papel *Kraft*, etiquetó y se obtuvo el peso húmedo con una báscula digital de plataforma marca *Pesola*[®] modelo PTS3000.

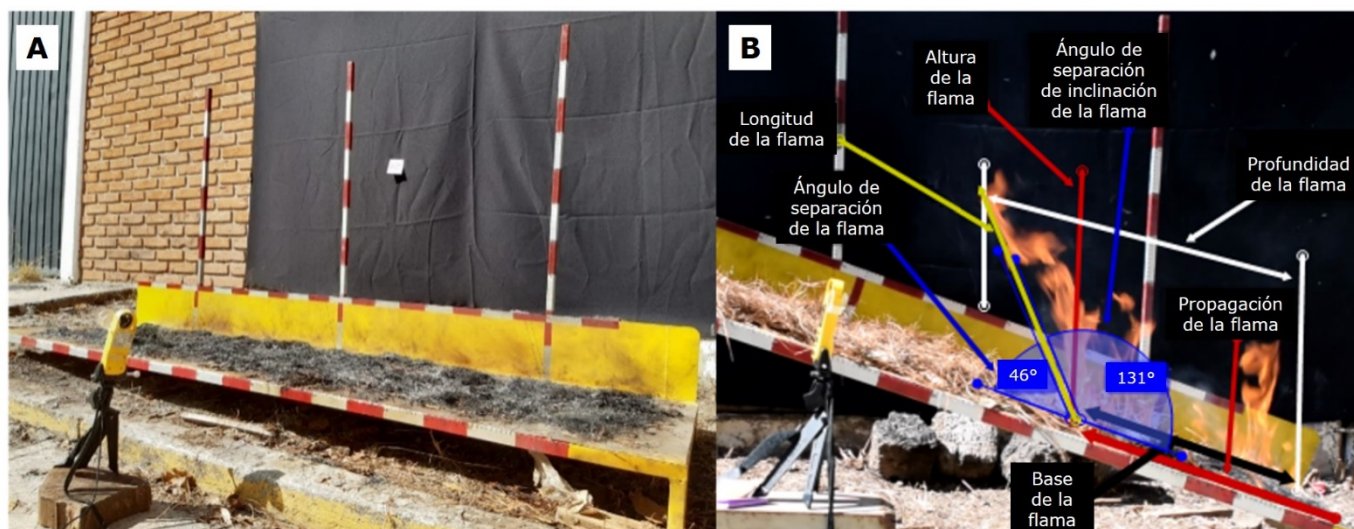
Las muestras se transportaron al Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES), Morelia, Michoacán para su secado en un horno marca *NOVATECH*[®] modelo Epr-01 a 79 °C. Se omitieron los combustibles leñosos y los conos para identificar el comportamiento del fuego solo para la capa de hojarasca, debido a que únicamente los combustibles finos influyen en la propagación del fuego (Morandini *et al.*, 2013). Después del secado, las muestras se pesaron para conocer su peso seco (Cuadro 1) y calcular la densidad aparente al dividir el peso seco por el grosor promedio de la capa de hojarasca en el área de recolecta (Morfin *et al.*, 2012).

Cuadro 1. Valores promedios de las características de las capas de hojarasca quemadas para cada condición de pendiente.

	Pino-encino			Pino-oyamel		
	0°	10°	20°	0°	10°	20°
wPre (kg m²)	0.7 (0.1)	0.4 (0.2)	0.5 (0.2)	0.5 (0.2)	0.3 (0.01)	0.7 (0.3)
Grosor (mm)	14.4 (3.1)	13.5 (2.7)	10.8 (3.2)	10.9 (3.3)	14.8 (2.1)	15.0 (4.2)
DA (kg m³)	4.9 (0.6)	2.8 (1.0)	5.3 (2.3)	4.4 (1.0)	2.2 (0.4)	4.7 (1.4)

wPre = Carga de combustibles prequemada; *DA* = Densidad aparente. Entre paréntesis se presenta la desviación estándar.

Para evaluar el comportamiento del fuego se diseñó una plataforma metálica resistente al calor de 225×50 cm; para ello, se usó la metodología de Sikkink *et al.* (2017) con modificaciones (Figura 1A). La plataforma se colocó a 13 cm del suelo en un área abierta propiedad de la Comisión Nacional Forestal (Conafor) en Morelia, Michoacán; además fue móvil permitiendo establecer tres pendientes (0°, 10° y 20°). Para medir la altura de la flama se colocaron postes graduados de un metro a 20, 95 y 170 cm de la longitud de la plataforma; perpendicularmente a esta, se instaló una cámara digital *Nikon*[®] modelo D5300 para registrar en tiempo real la velocidad de propagación y la geometría de la flama en cada quema (Figura 1B).



A = Consumo de combustibles después de la quema; B = Geometría y comportamiento el fuego.

Figura 1. Plataforma metálica de quema de combustibles forestales.

Quema de combustibles

Se puso un área *buffer* de acículas de pino en los primeros 25 cm de la plataforma. Después del *buffer* se extendió, uniformemente, la capa de hojarasca recolectada, se comprimió de manera manual asegurando un grosor homogéneo y similar al observado en campo. Las quemas se realizaron entre enero y febrero de 2021 a las 10 y 15 horas del día, y se iniciaron usando un fósforo. Se efectuaron seis réplicas para cada condición de pendiente, con ello se aseguró la consistencia de los resultados. No se controlaron las condiciones ambientales, por lo que se registró con un medidor *Kestrel*[®] 3000 una temperatura promedio de 29 °C, humedad relativa de 35 % y velocidad del viento de 2.24 km h⁻¹.

Medición de comportamiento del fuego

Se utilizó el programa de acceso libre *Kinovea* (Sánchez-Pay, 2018) para medir la geometría de la flama cada 5 segundos en los videos grabados; se capturó la altura, longitud y ángulo de la flama. La velocidad de propagación se determinó como el tiempo que el fuego tardó en recorrer la longitud de 200 cm de la capa de hojarasca; su intensidad se calculó mediante la Ecuación 1 propuesta por Byram (1959). Para estimar el consumo se consideró la diferencia de peso seco pre y posquemado, incluyendo los residuos carbonizados y la ceniza generada. La eficiencia de la combustión se evaluó con el Factor de eficiencia de combustión (*BEF*), mediante la Ecuación 2 propuesta por Russell-Smith *et al.* (2009).

$$I = HwR \quad (1)$$

Donde:

I = Intensidad del fuego (kW m^{-1})

H = Calor de combustión ($18\,608 \text{ kJ kg}^{-1} = 8\,000 \text{ BTU lb}^{-1}$)

w = Masa de hojarasca consumida (kg m^{-2})

R = Tasa de propagación (m min^{-1})

$$BEF = 1 - \frac{Mash}{Mfuel} \quad (2)$$

Donde:

BEF = Factor de eficiencia de combustión

$Mash$ = Carga residual de hojarasca no quemada más carga de ceniza

$Mfuel$ = Carga de hojarasca prequemada

Análisis de datos

Se evaluó la normalidad y homogeneidad de varianza con la prueba de *Lilliefors* (Drezner *et al.*, 2008) y la versión modificada de *Bartlett* (Arsham y Lovric, 2011), respectivamente. Cuando los supuestos no se cumplieron, se transformaron a logarítmicos (Zar, 2010). Para comparar la geometría del fuego, la velocidad de propagación y el consumo de hojarasca entre las comunidades arbóreas y pendientes se realizó una ANOVA con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$. Las diferencias significativas se identificaron con la prueba *post-hoc* de *Tukey*.

Además, se exploraron las relaciones entre las variables geométricas de la flama, la carga y el consumo mediante el Coeficiente de correlación de *Pearson*. Como paso final se hicieron ajustes con modelos exponenciales para estimar la velocidad de propagación (Ecuación 3) y la intensidad del fuego (Ecuación 4). Este enfoque permitió obtener información más detallada sobre la dinámica del fuego en relación con las variables estudiadas. Los análisis se llevaron a cabo utilizando el *software* R en su versión 4.0.3 (Rstudio Team, 2020).

$$ROS = aLF^b \exp(-cLF) \quad (3)$$

$$IR = aLF^b \quad (4)$$

Donde:

ROS = Velocidad de propagación

LF = Longitud de la flama

IR = Intensidad del fuego

a, b, c = Predictores obtenidos de ajuste

Resultados

Comportamiento del fuego

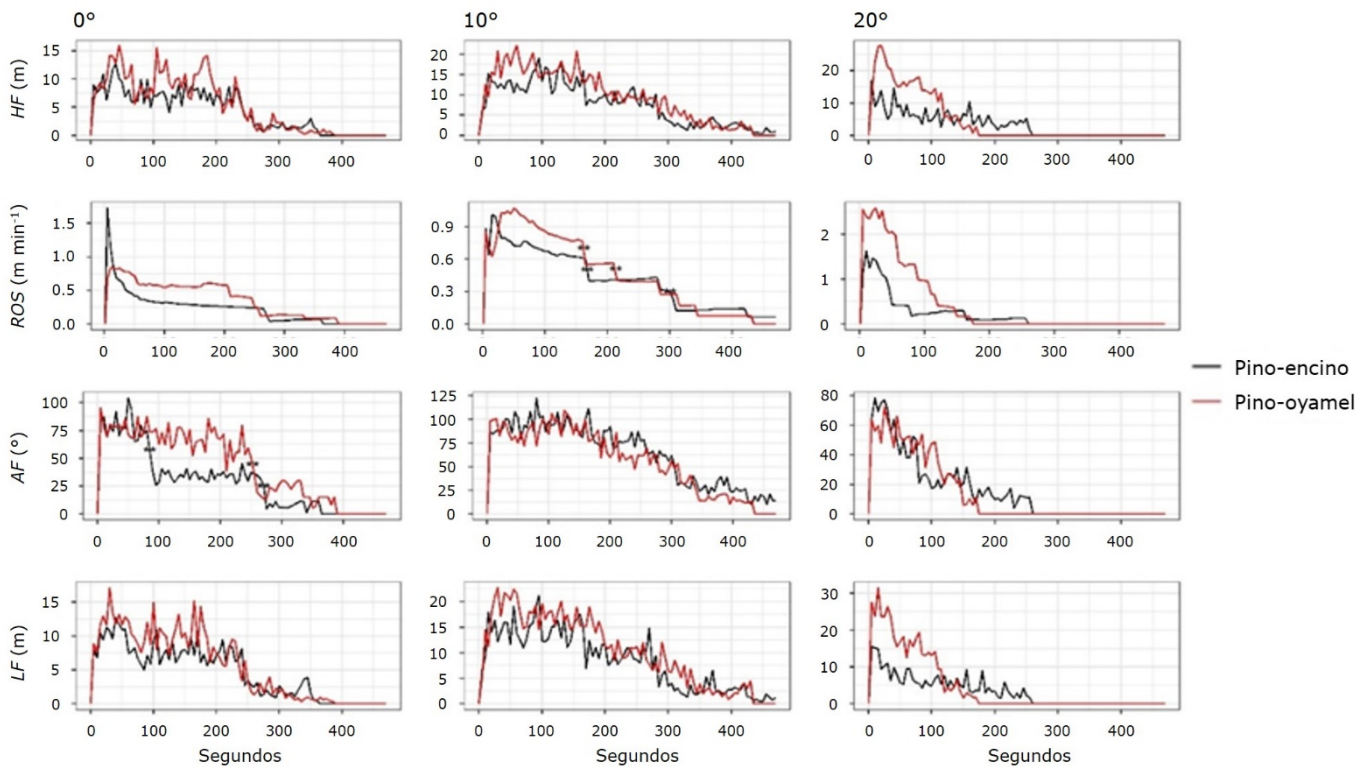
La quema de la capa de hojarasca indicó que la propagación del fuego, altura y longitud de la flama en pino-encino fue significativamente mayor, respecto a la de pino-oyamel; la propagación, las variables geométricas de la flama y la intensidad del fuego aumentaron de acuerdo a la pendiente (Cuadro 2). En ambas capas de hojarasca, el comportamiento del fuego aumentó rápidamente hasta alcanzar un punto máximo, para luego decrecer exponencialmente, a excepción del ángulo de

separación de la flama que disminuyó con los combustibles prequemados (Figura 2). En condiciones sin pendiente, la velocidad de propagación fue lenta y constante, mientras que en la pendiente de 20° el tiempo del recorrido del fuego disminuyó en un tercio, respecto a la pendiente de 0° y 10°; el ángulo de flama fue casi vertical.

Cuadro 2. Comportamiento del fuego de las capas de hojarasca quemadas.

Factor	ROS (m min ⁻¹)		HF (m)		LF (m)		AF (°)		IR (kW m ⁻¹)	
	M (sd)	p	M (sd)	p	M (sd)	p	M (sd)	p	M (sd)	p
CH		0.021		0.029		0.025		0.185		0.168
PO	0.41 (0.31)	b	0.11 (0.08)	b	0.12 (0.07)	b	86 (16)		40.24 (51.84)	
PE	0.65 (0.48)	a	0.16 (0.08)	a	0.17 (0.08)	a	80 (14)		59.61 (49.01)	
φ		<0.001		0.053		0.039		<0.001		<0.001
0°	0.30 (0.18)	b	0.10 (0.07)	b	0.11 (0.06)	b	80 (13)	a	28.51 (25.27)	b
10°	0.43 (0.17)	b	0.14 (0.05)	ab	0.16 (0.06)	ab	90 (10)	a	31.69 (21.42)	b
20°	0.91 (0.53)	a	0.17 (0.10)	a	0.18 (0.10)	a	69 (13)	b	94.44 (68.85)	a
CH× φ		0.218		0.235		0.111		0.683		0.358

ROS = Tasa de propagación; HF = Altura de la flama; LF = Longitud de la flama; AF = Ángulo de flama; IR = Intensidad del fuego; CH = Capa de hojarasca; φ = Pendiente; PO = Pino-oyamel; PE = Pino-encino; a, b y c = Grupos de variación; M = Media; sd = Desviación estándar.



HF = Altura de la flama; ROS = Tasa de propagación; AF = Ángulo de flama; LF = Longitud de la flama; ** = Efecto de muestras apagadas sin alcanzar el final de la cama de hojarasca.

Figura 2. Variables de comportamiento del fuego en tres pendientes *versus* tiempo para camas de hojarasca de pino-encino y pino-oyamel.

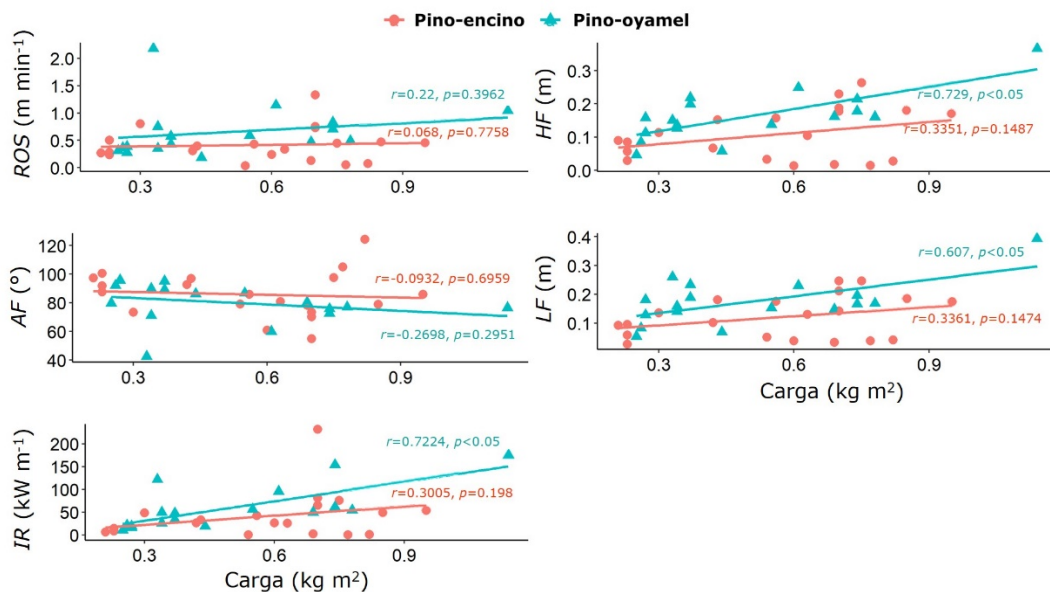
En ambas camas de hojarasca, las pendientes se correlacionaron significativamente con la velocidad de propagación, mientras que las variables geométricas del fuego tuvieron una correlación considerable y significativa con la pendiente en pino-oyamel, lo cual no pasó con pino-encino (Cuadro 3). En pino-encino, la velocidad del fuego fue más intermitente, se redujo el comportamiento del fuego y se generaron islas de hojarasca sin quemar. La carga de hojarasca prequemada de pino-oyamel se correlacionó significativamente con la intensidad del fuego, la altura y longitud de la flama (Figura 3). Además, la carga y el grosor de hojarasca

prequemada y las variables geométricas de la flama presentaron correlaciones con el consumo y el residuo de la posquema.

Cuadro 3. Correlación del consumo, residuo y pendientes con el comportamiento del fuego.

	<i>wPre</i>	Grosor	<i>ROS</i>	<i>LF</i>	<i>HF</i>	<i>IR</i>	<i>AF</i>	Consumo	<i>BEF</i>	Residuo
Consumo	0.77*	0.52*	0.69*	0.72*	0.77*	0.84*	0.26	-	-	-
Residuo	0.59*	0.70*	0.66*	0.82*	0.83*	0.74*	0.54*	0.67*	-	-
φ PO	-	-	0.68*	0.73*	0.63*	0.63*	-0.46	0.08	-0.04	-0.03
φ PE	-	-	0.61*	0.16	0.23	0.44	-0.53*	0.25	0.28	0.18

wPre = Carga prequema; *ROS* = Tasa de propagación; *LF* = Longitud de la flama; *HF* = Altura de la flama; *IR* = Intensidad del fuego; *AF* = Ángulo de flama; *BEF* = Factor de eficiencia de combustión; φ = Pendiente; PO = Pino-oyamel; PE = Pino-encino; Residuo = Residual carbonizado; * $p < 0.05$.



ROS = Tasa de propagación; *HF* = Altura de la flama; *AF* = Ángulo de flama; *LF* = Longitud de la flama; *IR* = Intensidad del fuego.

Figura 3. Grafica de dispersión y coeficientes de correlación para el comportamiento del fuego en las capas de hojarasca evaluadas.

Consumo de hojarasca

La carga de hojarasca pre y posquema, el consumo de hojarasca, los residuos carbonizados y el valor *BEF* no variaron en función de las comunidades arbóreas (Cuadro 4). No obstante, las quemas redujeron la carga posquema, con respecto a la carga inicial: $F_{1,31}=115.32$, $p<0.001$. Para el caso de la pendiente, solo influyó en la carga de hojarasca pre y posquema con mayor reducción de estas en la condición plana, donde la propagación del fuego fue más lenta, incluso fue similar en pendientes de 20°, donde fueron mayores la altura y longitud de la flama.

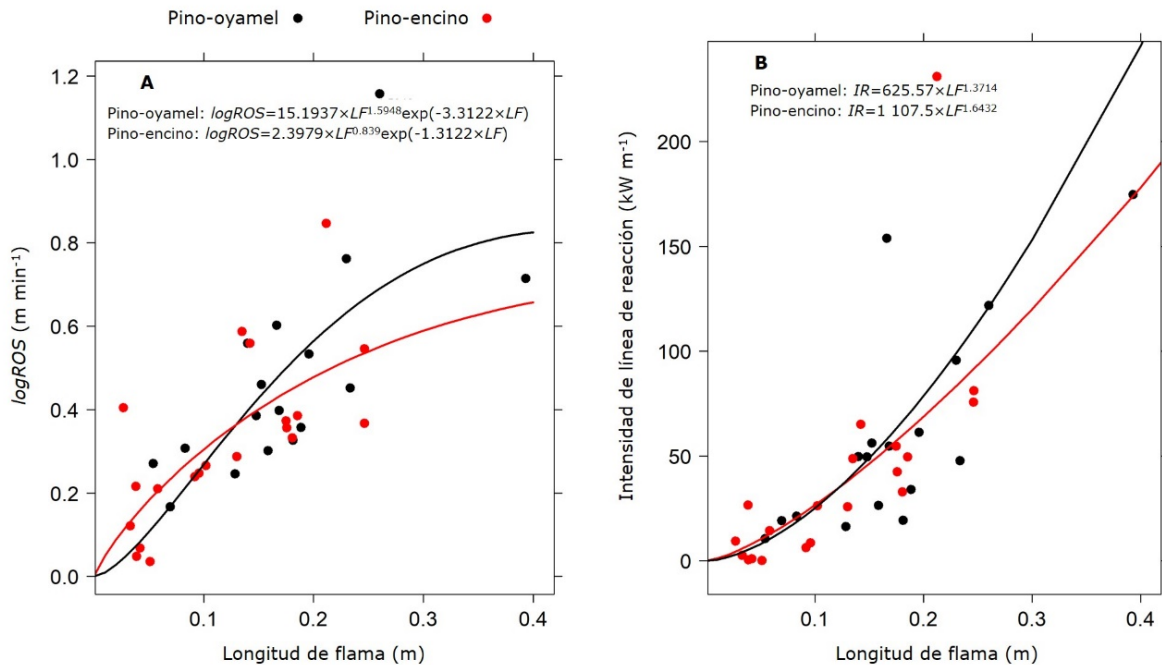
Cuadro 4. Carga de hojarasca pre y posquema, y variables de consumo.

Factor	<i>wPre</i> (kg m ²)		<i>wPos</i> (kg m ²)		Consumo (kg m ²)		Residuo (kg m ²)		<i>BEF</i>	
	<i>M</i> (<i>sd</i>)	<i>p</i>	<i>M</i> (<i>sd</i>)	<i>p</i>	<i>M</i> (<i>sd</i>)	<i>p</i>	<i>M</i> (<i>sd</i>)	<i>p</i>	<i>M</i> (<i>sd</i>)	<i>p</i>
CH		0.562		0.113		0.309		0.774		0.055
PO	0.50 (0.25)		0.21 (0.16)		0.27 (0.13)		0.017 (0.009)		0.60 (0.14)	
PE	0.57 (0.43)		0.33 (0.22)		0.22 (0.15)		0.016 (0.017)		0.45 (0.25)	
φ		0.005		0.007		0.109		0.870		0.098
0°	0.61 (0.21)	a	0.38 (0.24)	a	0.22 (0.15)		0.017 (0.020)		0.40 (0.26)	
10°	0.37 (0.15)	b	0.14 (0.08)	b	0.20 (0.08)		0.018 (0.007)		0.57 (0.14)	
20°	0.63 (0.27)	a	0.30 (0.18)	ab	0.32 (0.17)		0.015 (0.012)		0.50 (0.18)	
CH× φ		0.124		0.044		0.803		0.832		0.281

wPre = Carga prequema; *wPos* = Carga posquema; Residuo = Residual carbonizado; *BEF* = Factor de eficiencia de combustión; CH = Capa de hojarasca; φ = Pendiente; PO = Pino-oyamel; PE = Pino-encino; a, b y c = Grupos de variación; *M* = Media; *sd* = Desviación estándar.

Regresión de comportamiento del fuego

La velocidad de propagación e intensidad del fuego de las quemas de hojarasca se correlacionaron significativamente con la longitud de la flama ($r=0.91$ y $r=0.47$, respectivamente). El ajuste de la tasa de propagación respecto a la longitud de la flama presentó un r^2 de 0.38 en las dos capas de hojarasca (Figura 4). Mientras que el ajuste de la intensidad del fuego respecto a la longitud de flama registró un r^2 de 0.53 y 0.41 en pino-oyamel y pino-encino, respectivamente.



Ajuste de: A = Tasa de propagación logarítmica ($\log ROS$); B = Intensidad del fuego en función de la longitud de flama observada. La línea roja y negra de los gráficos corresponden a la capa de hojarasca de pino-encino y pino-oyamel, respectivamente.

Figura 4. Ajuste de modelos de predicción del comportamiento del fuego en quemas de capa de hojarasca.

Discusión

Comportamiento del fuego

Las quemas de capas de hojarasca demuestran que la velocidad de propagación, la altura y longitud de la flama aumentan con la pendiente, y el ángulo de separación de los combustibles prequemados con el fuego se reduce. Esto coincide con los resultados de Sánchez-Monroy *et al.* (2019), quienes usaron *WFDS* y obtuvieron un comportamiento inestable de fuego en pendientes mayores a 16° , con aumento de la propagación del fuego y el ángulo de inclinación de la flama. De igual manera, Pérez-Ramírez *et al.* (2017) compararon los resultados de simulaciones con *WFDS* y quema de acículas, observaron que el *WFDS* predijo escenarios dentro del intervalo de la propagación del fuego obtenidas por las quemas. Por lo que las pruebas con muestras de la capa de hojarasca tienen el potencial de predecir la propagación del fuego.

Las quemas experimentales muestran que la pendiente influye en la velocidad de propagación y permanencia del fuego; estos resultados son similares a los citados en quemas de acículas y por el *WFDS*, en los que se indica que después de 150 segundos de la ignición hay cambios en la propagación (Pérez-Ramírez *et al.*, 2017). Por lo que, en pendientes pronunciadas, la propagación se duplica respecto a las áreas con poca pendiente debido a una turbulencia de la flama que genera el viento, lo que incrementa el calor radiactivo hacia los combustibles prequemados (Morandini *et al.*, 2013; 2018).

Por ejemplo, Tihay *et al.* (2014) y Yang y Chen (2018) señalan que la radiación hacia los combustibles prequemados se incrementa a partir de pendientes de 15 a 20° e influyen en la velocidad de propagación. Además, en pendientes pronunciadas

la ignición de combustibles es más rápida (Silvani *et al.*, 2018), lo que aumenta el riesgo de avance vertical del fuego y el daño a la vegetación es mayor.

En quemas experimentales, se observa más intensidad del fuego en los primeros minutos, hasta alcanzar un punto máximo para posteriormente estabilizarse unos segundos para el caso de pendientes de 0° y 10°, luego disminuye exponencialmente. Esto coincide con los trabajos de Kreye *et al.* (2011) y Tihay *et al.* (2014). La reducción del comportamiento del fuego en los últimos segundos se debe a la falta de combustible en el frente a la línea de fuego, lo que reduce el calentamiento convectivo, por lo que solo queda la flama generada por la lenta combustión de residuos.

Además de la pendiente, la carga de combustible influye en la intensidad del fuego; asimismo, en áreas con alta carga de hojarasca, la altura y longitud de la flama aumentan (Kreye *et al.*, 2014) formando una distorsión en forma de V en la línea de fuego, como lo documentan Pérez-Ramírez *et al.* (2017) en quemas de acículas de pino.

El tamaño de los combustibles es importante debido al tiempo que tarda en iniciar el proceso de ignición. Los combustibles ligeros, como las acículas de pino por su porosidad y sensibilidad a la convección, facilitan la propagación del fuego sin penetrar profundamente, solo se quema la parte superficial (Morandini *et al.*, 2018). Esto por las características físicas de los combustibles ligeros que permiten la aireación de la capa de hojarasca y el cambio abrupto del comportamiento del fuego en una exposición de tiempo corto a las condiciones climáticas variables (Kauf *et al.*, 2018).

En capas heterogéneas de hojarasca, como las de pino-encino, se presentan islas sin quemar, que en áreas extensas favorecen a la flora y fauna, ya que sirven como refugio o áreas de producción y dispersión de semillas después de un incendio forestal (Meddens *et al.*, 2018). Por lo que el comportamiento del fuego está en

función de las características de la capa de hojarasca presente en las comunidades arbóreas.

Consumo de combustible

La carga de hojarasca quemada y el consumo se correlacionaron, lo cual sugiere que en áreas con mayor acumulación se espera más consumo, como indican Ottmar *et al.* (2016). En el presente estudio, el consumo fue menor al registrado en quemas experimentales en bosques de pino en Portugal (Fernandes y Loureiro, 2013) y el suroeste de Estados Unidos de América (Yokelson *et al.*, 2013). La falta de variación en el consumo entre capas de hojarasca podría deberse a que se quemó la carga existente en un metro cuadrado. Sin embargo, con carga estándar para todas las muestras, probablemente se observaría variación ya que, a mayor carga, el comportamiento del fuego y el consumo se incrementan.

En la investigación que aquí se documenta no se consideró el material leñoso caído (MLC), ni los arbustos. Sin embargo, Brewer *et al.* (2013) determinaron que el consumo del MLC varía según el tamaño, con mayor residuo en áreas con $MLC > 7.6$ cm, ya que los MLC grandes no se consumen por completo. Si estos logran incendiarse, se incrementan la longitud de la flama, la energía liberada y los gases calientes. Además, la presencia de arbustos aumenta la longitud de la flama, la intensidad del fuego, y el daño al dosel es superior; en consecuencia, se inicia un incendio de copa y la mortalidad de los árboles se incrementa (Silvani *et al.*, 2018; Varner *et al.*, 2021). Por lo que considerar únicamente el consumo de la capa de hojarasca no es suficiente para sugerir si varias dominancias arbóreas corresponden o no a una misma CC; de manera que es importante también incorporar el comportamiento del fuego.

Ajustes de propagación e intensidad del fuego

Las ecuaciones indican que el aumento de la longitud de la flama incrementa la propagación del fuego y su intensidad. El rápido aumento en la capa de hojarasca de pino-oyamel, en comparación con la de pino-encino, puede deberse a que está constituida, principalmente, por acículas largas que generan el doble de temperatura, respecto a capas sin acículas (Ellair y Platt, 2013). En contraste, en bosques de pino-encino, las hojas de encino son menos inflamables que las acículas, lo que resulta en una menor longitud de flama (Kreye *et al.*, 2020). Por lo tanto, la heterogeneidad de hojarasca permite variación en la ignición y la duración de la flama.

La intensidad del fuego respondió a la longitud de la flama, fue mayor en pino-oyamel. Sin embargo, es importante considerar que las quemas se realizaron en áreas cerradas, con poca influencia de las condiciones atmosféricas, las cuales si se incluyen y se controlan podrían cambiar el comportamiento del fuego.

Las ecuaciones obtenidas permiten predecir el comportamiento del fuego en función de la longitud de la flama generada por la capa de hojarasca. No obstante, incluir los arbustos y los MLC influirá considerablemente en el comportamiento del fuego, ya que varía según el tipo de vegetación (Rossa y Fernandes, 2018). Esto subraya la importancia de generar ecuaciones que incluyan la carga de todos los estratos del sotobosque para mejorar el ajuste (Cruz *et al.*, 2018). Asimismo, es esencial considerar la variación de la flamabilidad y consumo de los arbustos presentes en las comunidades arbóreas (Morandini *et al.*, 2019). Por lo tanto, de acuerdo al comportamiento del fuego entre las dominancias arbóreas y la inflamabilidad de las especies distribuidas es posible determinar si corresponden a una misma CC.

Conclusiones

La quema de la capa de hojarasca de las comunidades arbóreas de pino-encino y pino-oyamel varían en comportamientos de fuego, pero no en el consumo, ya que el grosor y la continuidad de combustibles influyen en la permanencia del fuego. La pendiente incide en el aumento de la longitud e inclinación de la flama mediante el incremento de la velocidad de propagación del fuego en la capa de hojarasca compuesta de pino-oyamel, respecto a la de pino-encino. Los resultados sugieren que las comunidades arbóreas de pino-oyamel y pino-encino corresponden a camas de combustibles diferentes. La quema de combustibles en condiciones manejables permite obtener datos del comportamiento del fuego de las áreas donde no es permitido su uso, además de generar ecuaciones del comportamiento del fuego.

Agradecimientos

El primer autor agradece al Conahcyt por la beca de posgrado otorgada; a los comisariados ejidales y comunidades de la RBMM por el permiso para entrar en sus propiedades; al IIES de la UNAM, Campus Morelia; al programa PAPIIT-UNAM por el apoyo a través del proyecto "El fuego en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca: caracterización de un proceso socioeconómico" (IN214820); y a la Promotoría de la Conafor-Morelia, Michoacán.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Rubén Ortiz-Mendoza: planeación y desarrollo del experimento, análisis estadístico y redacción del manuscrito; Marco A. González-Tagle y Diego R. Pérez-Salicrup: supervisión del diseño del experimento y revisión del documento; Oscar A. Aguirre-Calderón, Wibke Himmelsbach y Luis G. Cuéllar-Rodríguez: revisión del manuscrito.

Referencias

- Arsham, H. and M. Lovric. 2011. Bartlett's Test. *In*: Lovric, M. (Edit.). International Encyclopedia of Statistical Science. Springer. Berlin, Bel., Germany. pp. 87-89.
- Brewer, N. W., A. M. S. Smith, J. A. Hatten, P. E. Higuera, ... and W. T. Tinkham. 2013. Fuel moisture influences on fire-altered carbon in masticated fuels: An experimental study. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 118:30-40. Doi: 10.1029/2012JG002079.
- Byram, G. M. 1959. Combustion of forest fuels. *In*: Davis, K. P. (Edit.). Forest fire: control and use. McGraw-Hill. New York, NY, United States of America. pp. 61-89.
- Cochrane, M. A. 2009. Tropical Fire Ecology: Climate change, land use, and ecosystem dynamics. Springer-Praxis Books. Chichester, SXW, United Kingdom. 682 p.
- Cornelissen, J. H. C., S. Grootemaat, L. M. Verheijen, W. K. Cornwell, ... and R. Aerts. 2017. Are litter decomposition and fire linked through plant species traits? *New Phytologist* 216(3):653-669. Doi: 10.1111/nph.14766.
- Cruz, M. G., M. E. Alexander, A. L. Sullivan, J. S. Gould and M. Kilinc. 2018. Assessing improvements in models used to operationally predict wildland fire rate of spread. *Environmental Modelling & Software* 105:54-63. Doi: 10.1016/j.envsoft.2018.03.027.

- Cruz, M. G., W. L. McCaw, W. R. Anderson and J. S. Gould. 2013. Fire behaviour modelling in semi-arid mallee-heath shrublands of southern Australia. *Environmental Modelling & Software* 40:21-34. Doi: 10.1016/j.envsoft.2012.07.003.
- Drezner, Z., O. Turel and D. Zerom. 2008. A modified Kolmogorov-Smirnov test for normality. *Communications in Statistics-Simulation and Computation* 39:1-20. Doi: 10.1080/03610911003615816.
- Ellair, D. P. and W. J. Platt. 2013. Fuel composition influences fire characteristics and understorey hardwoods in pine savanna. *Journal of Ecology* 101(1):192-201. Doi: 10.1111/1365-2745.12008.
- Fernandes, P. M. and C. Loureiro. 2013. Fine fuels consumption and CO₂ emissions from surface fire experiments in maritime pine stands in northern Portugal. *Forest Ecology and Management* 291:344-356. Doi: 10.1016/j.foreco.2012.11.037.
- Francos, M., X. Úbeda, P. Pereira and M. Alcañiz. 2018. Long-term impact of wildfire on soils exposed to different fire severities. A case study in Cadiretes Massif (NE Iberian Peninsula). *Science of the Total Environment* 615:664-671. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.311.
- Grootemaat, S., I. J. Wright, P. M. van Bodegom and J. H. C. Cornelissen. 2017. Scaling up flammability from individual leaves to fuel beds. *Oikos* 126(10):1428-1438. Doi: 10.1111/oik.03886.
- Kauf, Z., W. Damsohn and A. Fangmeier. 2018. Do relationships between leaf traits and fire behaviour of leaf litter beds persist in time? *PLoS ONE* 13(12):e0209780. Doi: 10.1371/journal.pone.0209780.
- Kreye, J. K., J. M. Kane, J. M. Varner and J. K. Hiers. 2020. Radiant heating rapidly increases litter flammability through impacts on fuel moisture. *Fire Ecology* 16:1-10. Doi: 10.1186/s42408-020-0067-3.
- Kreye, J. K., J. M. Varner and E. E. Knapp. 2011. Effects of particle fracturing and moisture content on fire behaviour in masticated fuelbeds burned in a laboratory. *International Journal of Wildland Fire* 20(2):308-317. Doi: 10.1071/WF09126.

- Kreye, J. K., N. W. Brewer, P. Morgan, J. M. Varner, ... and R. D. Ottmar. 2014. Fire behavior in masticated fuels: A review. *Forest Ecology and Management* 314:193-207. Doi: 10.1016/j.foreco.2013.11.035.
- Matsypura, D., O. A. Prokopyev and A. Zahar. 2018. Wildfire fuel management: Network-based models and optimization of prescribed burning. *European Journal of Operational Research* 264(2):774-796. Doi: 10.1016/j.ejor.2017.06.050.
- Meddens, A. J. H., C. A. Kolden, J. A. Lutz, A. M. S. Smith, ... and M. A. Krawchuk. 2018. Fire Refugia: What are they, and why do they matter for global change? *BioScience* 68(12):944-954. Doi: 10.1093/biosci/biy103.
- Miloua, H. 2019. Fire behavior characteristics in a pine needle fuel bed in northwest Africa. *Journal of Forestry Research* 30:959-967. Doi: 10.1007/s11676-018-0676-8.
- Morandini, F., P. A. Santoni, J. B. Tramoni and W. E. Mell. 2019. Experimental investigation of flammability and numerical study of combustion of shrub of rockrose under severe drought conditions. *Fire Safety Journal* 108:102836. Doi: 10.1016/j.firesaf.2019.102836.
- Morandini, F., X. Silvani, J. L. Dupuy and A. Susset. 2018. Fire spread across a sloping fuel bed: Flame dynamics and heat transfers. *Combustion and Flame* 190:158-170. Doi: 10.1016/j.combustflame.2017.11.025.
- Morandini, F., Y. Perez-Ramirez, V. Tihay, P. A. Santoni and T. Barboni. 2013. Radiant, convective and heat release characterization of vegetation fire. *International Journal of Thermal Sciences* 70:83-91. Doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2013.03.011.
- Morfin R., J. E., E. J. Jardel P., J. M. Michel F. y E. Alvarado C. 2012. Caracterización y cuantificación de combustibles forestales. Comisión Nacional Forestal y Universidad de Guadalajara. Zapopan, Jal., México. 110 p. <http://www.conafor.gob.mx:8080/biblioteca/ver.aspx?articulo=459>. (19 de mayo de 2020).

- Morgan V., J., J. M. Kane, J. K. Kreye and E. Engber. 2015. The flammability of forest and woodland litter: A synthesis. *Current Forestry Reports* 1:91-99. Doi: 10.1007/s40725-015-0012-x.
- Ottmar, R. D., A. T. Hudak, S. J. Prichard, C. S. Wright, ... and R. E. Vihnanek. 2016. Pre-fire and post-fire surface fuel and cover measurements collected in the southeastern United States for model evaluation and development-RxCADRE 2008, 2011 and 2012. *International Journal of Wildland Fire* 25:10-24. Doi: 10.1071/WF15092.
- Perez-Ramirez, Y., P. A. Santoni, J. B. Tramoni, F. Bosseur and W. E. Mell. 2017. Examination of WFDS in modeling spreading fires in a furniture calorimeter. *Fire Technology* 53(5):1795-1832. Doi: 10.1007/s10694-017-0657-z.
- Rossa, C. G. and P. M. Fernandes. 2018. Empirical Modeling of Fire Spread Rate in No-Wind and No-Slope Conditions. *Forest Science* 64(4):358-370. Doi: 10.1093/forsci/fxy002.
- Rstudio Team. 2020. RStudio: Integrated Development Environment for R (Version 4.0.3.). Boston, MA, United States of America. R Foundation for Statistical Computing.
- Russell-Smith, J., B. P. Murphy, C. P. (Mick) Meyer, G. D. Cook, ... and P. Brocklehurst. 2009. Improving estimates of savanna burning emissions for greenhouse accounting in northern Australia: limitations, challenges, applications. *International Journal of Wildland Fire* 18(1):1-18. Doi: 10.1071/WF08009.
- Sánchez-Monroy, X., W. Mell, J. Torres-Arenas and B. W. Butler. 2019. Fire spread upslope: Numerical simulation of laboratory experiments. *Fire Safety Journal* 108:102844. Doi: 10.1016/j.firesaf.2019.102844.
- Sánchez-Pay, A. 2018. El uso de Kinovea para el análisis biomecánico desde una perspectiva cuantitativa. *Trances* 10(6):725-738. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7076665>. (2 de marzo de 2021).
- Sikkink, P. G., T. B. Jain, J. Reardon, F. A. Heinsch, ... and L. S. Baggett. 2017. Effect of particle aging on chemical characteristics, smoldering, and fire behavior in

mixed-conifer masticated fuel. *Forest Ecology and Management* 405:150-165. Doi: 10.1016/j.foreco.2017.09.008.

Silvani, X., F. Morandini, J. L. Dupuy, A. Susset, R. Vernet and O. Lambert. 2018. Measuring velocity field and heat transfer during natural fire spread over large inclinable bench. *Experimental Thermal and Fluid Science* 92:184-201. Doi: 10.1016/j.expthermflusci.2017.11.020.

Tihay, V., F. Morandini, P. A. Santoni, Y. Perez-Ramirez and T. Barboni. 2014. Combustion of forest litters under slope conditions: Burning rate, heat release rate, convective and radiant fractions for different loads. *Combustion and Flame* 161(12):3237-3248. Doi: 10.1016/j.combustflame.2014.06.003.

Varner, J. M., S. M. Hood, D. P. Aubrey, K. Yedinak, ... and E. M. Rowell. 2021. Tree crown injury from wildland fires: causes, measurement and ecological and physiological consequences. *New Phytologist* 231(5):1676-1685. Doi: 10.1111/nph.17539.

Yang, Z. and H. Chen. 2018. Experimental study on flame geometry along the inclined surface with and without Sidewalls by using a gas burner. *Procedia Engineering* 211:925-933. Doi: 10.1016/j.proeng.2017.12.094.

Yokelson, R. J., I. R. Burling, J. B. Gilman, C. Warneke, ... and D. R. Weise. 2013. Coupling field and laboratory measurements to estimate the emission factors of identified and unidentified trace gases for prescribed fires. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13:89-116. Doi: 10.5194/acp-13-89-2013.

Zar, J. H. 2010. *Biostatistical Analysis*. Pearson Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, United States of America. 944 p.



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