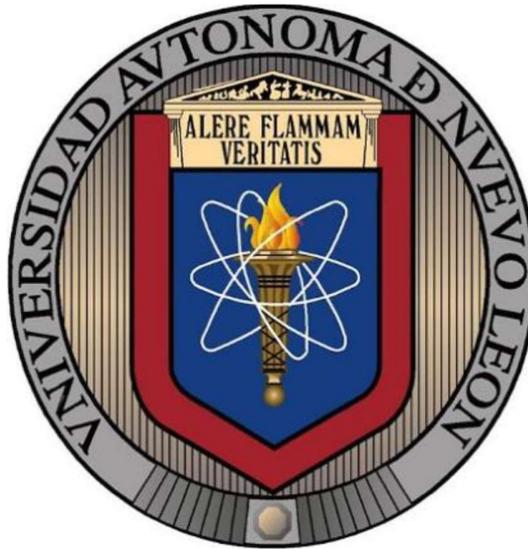


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE INCENDIOS Y SUS EFECTOS
PARA LA TOMA DE DECISIONES EN PLANES DE MANEJO DEL FUEGO
EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA MARIPOSA MONARCA**

POR:

RUBEN ORTIZ MENDOZA

**Como requisito parcial para obtener el grado de
DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MANEJO DE RECURSOS
NATURALES**

Linares, Nuevo León, México

Julio, 2024

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE INCENDIOS Y SUS EFECTOS
PARA LA TOMA DE DECISIONES EN PLANES DE MANEJO DEL FUEGO
EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA MARIPOSA MONARCA**

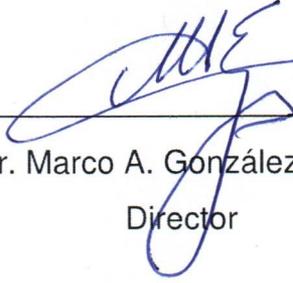
TESIS DOCTORAL

**Como requisito parcial para obtener el grado de
DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MANEJO DE RECURSOS
NATURALES**

POR:

Ruben Ortiz Mendoza

Comité de Tesis:



Dr. Marco A. González Tagle
Director



Dr. Oscar A. Aguirre Calderón
Codirector



Dra. Wibke Himmelsbach
Asesor



Dr. Luis G. Cuéllar Rodríguez
Asesor



Dr. Diego R. Pérez Salicrup
Codirector externo

Linares, Nuevo León, México

Julio, 2024

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONAHCYT), por la beca otorgada para realizar el doctorado.

A la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, por permitir cursar el programa de posgrado.

Al Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, por el espacio durante mi estancia y equipos prestados para las salidas al campo.

A la RBMM, a los ejidos y comunidades que son parte de la RBMM, por permitirme hacer mi trabajo en sus predios.

Al Centro Estatal contra Incendios Forestales de Michoacán, de la Comisión Nacional Forestal, centro Morelia, por prestar el espacio para realizar mis experimentos de quemas de hojarasca.

A mis compañeros y amigos del Laboratorio de Ecología y Manejo de Recursos Forestales del Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México, por el apoyo en las salidas a campo, consejos y sugerencias.

Al comité de tesis integrada por el Dr. Marco A. González Tagle, Dr. Diego R. Pérez-Salicrup, Dr. Oscar A. Aguirre-Calderón, Dr. Wibke Himmelsbach y al Dr. Luis G. Cuéllar-Rodríguez, por su asesoría, disposición y revisiones hacer posible la investigación y culminar el programa de doctorado.

DEDICATORIA

A mis padres: Juana Mendoza y Santiago Ortiz Aguilar[†], este logro es también de ustedes.

A mis hermanas: Hilda Ortiz Mendoza, Edith Ortiz Mendoza, Pilar Ortiz Mendoza, por sus motivaciones y apoyo incondicional que me han dado para seguir adelante, de igual manera este logro es también de ustedes.

A mis tíos, tías, primos, primas y amigos por sus motivaciones para seguir adelante en este proceso de posgrado.

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE.....	I
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IV
ÍNDICE DE CUADROS.....	VI
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
OBJETIVO GENERAL.....	5
Objetivos específicos.....	5
CAPITULO I. CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE COMBUSTIBLES FORESTALES EN TRES DOMINANCIAS ARBÓREAS.....	6
1.1. RESUMEN.....	6
1.2. ABSTRACT.....	7
1.3. INTRODUCCIÓN.....	7
1.4. MATERIAL Y MÉTODOS.....	10
1.4.1. Área de estudio.....	10
1.4.2. Medición de variables.....	12
1.4.3. Análisis de datos.....	13
1.5. RESULTADOS.....	14
1.5.1. Estructura forestal.....	14
1.5.2. Arbustos.....	16
1.5.3. Material leñoso caído.....	16
1.5.4. Capa de hojarasca y fermentación.....	18
1.5.5. Relación multivariante de combustibles.....	19
1.6. DISCUSIÓN.....	21
1.6.1. Carga de combustibles por estrato.....	21
1.6.2. Relación de la estructura forestal con la carga de combustibles.....	22
1.6.3. Carga de combustibles y riesgos de incendios.....	23
1.7. CONCLUSIÓN.....	25
CAPÍTULO II. COMPORTAMIENTO DEL FUEGO EN TRES DOMINANCIAS ARBÓREAS.....	26

2.1. RESUMEN.....	26
2.2. ABSTRACT	27
2.3. INTRODUCCIÓN.....	27
2.4. MATERIAL Y MÉTODOS	30
2.4.1. Quema de acículas forestales	30
2.4.2. Comportamiento del fuego por Fuel Fire Tools	32
2.4.3. Análisis de datos	33
2.5. RESULTADOS	34
2.5.1. Comportamiento superficial y geometría del fuego por acículas	34
2.5.2. Correlación de variables geométricas del fuego.....	36
2.5.3. Efecto de los estratos en el comportamiento superficial del fuego...	37
2.5.4. Regresión del comportamiento del fuego por acículas.....	39
2.5.5. Regresión de comportamiento del fuego en el sotobosque.....	41
2.6. DISCUSIÓN.....	45
2.7. CONCLUSIONES	48
CAPITULO III. CONSUMO DE COMBUSTIBLES Y EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO	49
3.1. RESUMEN.....	49
3.2. ABSTRACT	50
3.3. INTRODUCCIÓN.....	50
3.4. MATERIAL Y MÉTODOS	53
3.4.1. Cálculo de consumo y emisiones por quemas de acículas	53
3.4.2. Uso de Fuel Fire Tools	54
3.4.3. Análisis estadístico	54
3.5. RESULTADOS	55
3.5.1. Consumo de combustibles por quemas de acículas	55
3.5.2. Emisión por quemas de acículas.....	58
3.5.3. Consumo de combustibles por Fuel Fire Tools	59
3.5.4. Emisión por quemas por Fuel Fire Tools.....	61
3.6. DISCUSIONES	63
3.6.1. Consumo de combustible	63

3.6.2. Emisión de gases de efecto invernadero.....	64
3.6.3. Ecuaciones de predicción.....	66
3.7. CONCLUSIONES.....	67
4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN GENERAL.....	68
BIBLIOGRAFÍA.....	73
ANEXOS.....	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio y camas de combustibles evaluadas en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.....	11
Figura 2. Distribución de la categoría diamétrica de las dominancias arbóreas de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.....	15
Figura 3. Altura, cobertura y carga de arbustos en dos condiciones de pendiente y ladera de las dominancias arbóreas de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.	16
Figura 4. Carga promedio de combustibles en el sotobosque por estrato en las dominancias arbóreas de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca..	17
Figura 5. Diagrama de caja y bigotes de las cargas de las partículas de MLC de acuerdo a pendientes, ladera y dominancia arbórea.....	18
Figura 6. a) Grosor promedio de la capa de hojarasca y b) grosor de la capa de fermentación en pendientes mayores y menores de 35° y en las laderas norte y sur de las dominancias arbóreas evaluadas.....	19
Figura 7. Relaciones biplot de: análisis de componentes principales como variables y unidad experimental; y ordenación de análisis de redundancia	20
Figura 8. Plataforma metálica de medición del geometría y comportamiento el fuego.	31
Figura 9. Altura de la flama, velocidad de propagación, ángulo de flama y longitud de flama de la capa de acículas de tres dominancias arbóreas en tres condiciones de pendiente.....	36
Figura 10. Grafica de dispersión y coeficientes de correlación para el comportamiento del fuego en las tres dominancias arbóreas evaluadas..	37
Figura 11. Variación en velocidad de propagación, longitud de flama e intensidad de línea de fuego de las dominancias arbóreas de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.....	38
Figura 12. Intensidad de línea de fuego y grosor (altura) de estratos en las dominancias arbóreas evaluadas.....	39

Figura 13. Propagación del fuego y geometría del fuego observada vs predicha para los datos obtenidos en las quemas.	40
Figura 14. Ajuste de datos y valores predichos vs valores observados de las quemas de acículas.....	42
Figura 15. Tasa de propagación logarítmica e intensidad de línea de fuego en función de la longitud de flama de los escenarios de humedad de Fuel Fire Tools.....	43
Figura 16. Tasa de propagación logarítmica y longitud de flama observada vs predicha para los datos obtenidas de Fuel Fire Tools.....	44
Figura 17. Relación biplot de ordenación de análisis de redundancia.	44
Figura 18. Gráficos de consumo, factor de eficiencia de combustión y residuo carbonizado observados y predichos.	58
Figura 19. Gráficos de emisiones observados y predichos en función de la proporción de combustible consumido, carga de combustible quemado y la intensidad de línea de fuego.	59
Figura 20. Consumo de combustibles por estrato y por fase de combustión para la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca predichos por CONSUME.	60
Figura 21. Emisiones en las tres dominancias arbóreas de acuerdo a los escenarios de humedad muy baja, baja, moderada y alta.	61
Figura 22. Biplot de las características de los combustibles, consumo y emisión de GEI de las quemas de acículas.....	68
Figura 23. Distribuciones de la densidad de frecuencias del potencial el fuego obtenido por Fuel Fire Tools para las dominancias arbóreas o camas de combustibles forestales evaluados de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.	69
Figura 24. Islas de combustibles no quemadas en las quemas de la capa de hojarasca de pino-encino y diferente intensidad de incendio forestal ocurrido 2018 en el Ejido Angangueo.	70
Figura 25. Biplot de las características de los combustibles de todos los estratos, consumo y emisión de GEI predichos por Fuel Fire Tools	71

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Ecuaciones alométricas empleadas para calcular la biomasa aérea de las especies encontradas en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.	13
Cuadro 2. Valores promedios de las variables descriptivas de las dominancias arbóreas evaluadas.	14
Cuadro 3. Valores promedios de las variables descriptivas de las dominancias arbóreas evaluadas por estrato en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.	15
Cuadro 4. Carga promedio del MLC, capa de hojarasca y fermentación en laderas norte y sur de las dominancias arbóreas evaluadas.	17
Cuadro 5. Parámetros de entrada de las camas de combustibles forestales en Fuel Fire Tools.	32
Cuadro 6. Escenario de contenido de humedad de los combustibles vivos y muertos para la predicción del potencial del fuego predeterminados en Fuel Fire Tools.	33
Cuadro 7. Características de los combustibles quemados y tiempo atmosférico del ambiente durante las quemas.	34
Cuadro 8. Comportamiento del fuego en las camas de acículas de tres dominancias arbóreas de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca en tres condiciones de pendiente.	35
Cuadro 9. Comportamiento el fuego en las dominancias arbóreas evaluadas de acuerdo a los cuatro escenarios de humedad, por Fuel Fire Tools.	38
Cuadro 10. Correlación del grosor de los estratos con la tasa de propagación, longitud de flama e intensidad de línea de fuego.	39
Cuadro 11. Modelos lineales múltiples predictores de la geometría del fuego en las dominancias arbóreas.	40
Cuadro 12. Resumen de estadísticos de los modelos de la tasa de propagación e intensidad de línea de fuego en las dominancias arbóreas evaluados por las quemas de acículas y por los escenarios de humedad del Fuel Fire Tools	41

Cuadro 13. Escenario de contenido de humedad de los combustibles y consumo, para la predicción del consumo de combustibles usando CONSUME.	54
Cuadro 14. Promedio y significancia de ANOVA de la carga de combustibles antes y después de las quemas, consumo, factor de eficiencia y residual carbonizado entre las dominancias arbóreas o camas de combustibles forestales y pendientes en grados.....	55
Cuadro 15. Ecuaciones de estimación de consumo y gases emitidos por las quemas de camas de hojarascas realizadas.....	56
Cuadro 16. Correlación entre el consumo, porcentaje de consumo y residuo carbonizado con la carga de combustible quemada, densidad aparente, grosor de la cama de acículas quemada y el comportamiento del fuego.	57
Cuadro 17. Emisiones obtenidas de las quemas de acículas y por CONSUME en las tres dominancias arbóreas y en los cuatro escenarios de humedad. .	58
Cuadro 18. Medias de consumo por quema de acículas y predichas por CONSUME en las tres dominancias arbóreas.	60
Cuadro 19. Medias de las emisiones predichas por CONSUME en cuatro escenarios de humedad..	62

INTRODUCCIÓN GENERAL

Los incendios forestales han estado presentes en el mundo siendo parte de la evolución de los seres vivos (Bowman et al., 2011; He & Lamont, 2018; Pausas & Keeley, 2019). Un incendio inicia por la interacción de los combustibles, el oxígeno y una energía de activación de la combustión; cuando el fuego sale de control en áreas forestales inicia el incendio forestal variando en el comportamiento del fuego de acuerdo a los combustibles, condiciones atmosféricas y topografía del lugar (Cochrane, 2009; Rodríguez-Trejo, 2014). De la misma manera, el comportamiento depende del tipo de vegetación, la adaptación de la vegetación al fuego y el régimen de incendios forestales, esta última influye en la intensidad y severidad del fuego (Rodríguez, 2008).

Los combustibles forestales corresponden a la biomasa disponible a quemarse, de las cuales los combustibles superficiales son el umbral para la propagación del fuego (Werth et al., 2011); por ejemplo, la variación y dominancia de pastos, arbustos o árboles condicionan el comportamiento del fuego. Así mismo, las características estructurales del rodal, la composición arbórea y la gradiente bioclimática en la que se encuentra un bosque influye en la acumulación de los combustibles, por lo tanto, en el comportamiento del fuego y en los efectos de los incendios forestales (Cansler et al., 2021; Hessburg et al., 2007). Sin embargo, la distribución y condición de los combustibles disponibles a quemarse es dinámico y complejo en espacio y tiempo (Fry et al., 2018; Keane, 2015).

El tiempo atmosférico define la humedad de los combustibles, y esta a su vez define el comportamiento del fuego. En efecto, las condiciones atmosféricas y los tipos de vegetación definen el régimen de fuego, e influyen en la carga de combustibles y su respuesta al fuego (Kreye et al., 2013; Werth et al., 2011). Así también, el comportamiento del fuego está en función de la pendiente del terreno y el viento; ambas influyen en la velocidad de propagación y en el ángulo de la inclinación de la flama, aportando radiación a los combustibles prequemados acelerando la pérdida de humedad y su rápida ignición. Por ejemplo, en los cañones el comportamiento del fuego aumenta considerablemente con comportamiento explosivo y de alta peligrosidad (Werth et al., 2011).

Por su parte, el comportamiento del fuego define el consumo de combustible variando de acuerdo a la temporada del año, la inactividad de las plantas, y del tiempo atmosférico (Ottmar, 2014; Vaughan et al., 2021). El consumo, el tipo de vegetación donde se desarrolla el incendio forestal, el tipo de incendio (subterráneo, superficial, de copa), el tiempo atmosférico, la fase de combustión, los combustibles consumidos, entre otros factores, influyen en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos a la atmósfera; tales como dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), óxido de nitrógeno (NO_x), carbono orgánico volátil (VOC), partículas de carbono (PM) de 2.5 y 10 micras, entre otros (Kreye et al., 2014; Ottmar, 2014).

Para reducir los efectos de los incendios forestales se implementa el manejo de combustibles forestales. Esto debido a que los tratamientos de combustibles influyen en el comportamiento del fuego y reducen la severidad de los incendios forestales (Cansler et al., 2021; Kreye et al., 2014). Por lo cual, para reducir los efectos de los incendios forestales se realizan actividades de prevención como brechas cortafuegos, líneas negras, quemas prescritas y quemas controladas, pero cumpliendo con las normas especificadas por la Comisión Nacional Forestal para el caso de México (SEMARNAT, 2009).

En México, los incendios forestales han aumentado en la última década siendo más constantes a partir de 2017 y con mayor presencia en los estados del centro del país según el Sistema Nacional de Información Forestal (CONAFOR, 2021). La presencia de incendios está influenciada por las sequías en la temporada de estiaje (Cisneros-González et al., 2018), donde la carga de combustibles y su baja humedad influyen en el comportamiento del fuego aumentando los efectos de los incendios forestales (Glitzenstein et al., 2006). Por ejemplo, en áreas protegidas donde el manejo de combustibles es limitado y la exclusión de incendios influye en la acumulación de los combustibles aumentando el riesgo y peligro de incendios forestales (Bentley & Penman, 2017; Fry et al., 2018). Tal es el caso de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM), donde la gestión del fuego está enfocada al combate de incendios y a la supresión (Pérez-Salicrup et al., 2016).

La RBMM forma parte del Eje Neovolcánico Mexicano, la cual tiene una alta composición florística de especies endémicas y una gran importancia ecológica por la hibernación de la mariposa monarca (*Danaus plexippus* L.), especie que viaja desde Canadá y Estados Unidos de América (Cornejo-Tenorio & Ibarra-Manríquez, 2017; Diffendorfer et al., 2020); además, corresponde a un área de refugio para la flora y fauna, así como aportar beneficios directos e indirectos por los servicios ecosistémicos. El tipo de vegetación es dominada por bosque de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl & Cham) en altitud mayor a 2800 m, bosque codominados de pino-oyamel (*Pinus* sp.-*A. religiosa*) entre los 2800 a 3150 msnm, bosque dominados de pino (*Pinus* sp.) en altitud menor de 2850 m, bosque dominados de encino (*Quercus* sp.) en altitud menor de 3000 m, bosque dominados de cedro (*Cupressus* sp.) entre los 2400 y 2600 msnm (Sáenz-Ceja & Pérez-Salicrup, 2019; Carlón-Allende et al., 2016; Cornejo-Tenorio et al., 2003). Los bosques de la RBMM no están exentos de incendios forestales teniendo un régimen de 2.2, 2.9 y 2.2 años en áreas de oyamel, pino y pino-oyamel, respectivamente (Sáenz-Ceja & Pérez-Salicrup, 2019). La mayor ocurrencia es en los bosques fragmentados y cercanos a las poblaciones (Farfán et al., 2018) debido al escape del fuego por quemas agrícolas y de pastizales, por descuidos e incluso por problemas de tenencia de tierra ocasionando incendios de intensidades bajas a medias (Pérez-Salicrup et al., 2016). Sin embargo, las comunidades locales de la RBMM emplean el uso tradicional del fuego para la agricultura y por el conocimiento empírico adquirido del comportamiento y manejo del fuego han evitado el escape del fuego en las quemas agrícolas (Martínez-Torres et al., 2016), por lo que las comunidades no pueden ser los responsables absolutos de ocurrencia de incendios.

La RBMM, al ser un área protegida se combaten y se suprimen los incendios forestales. Esto podría influir en la acumulación de forma natural de los combustibles forestales, aumentando el riesgo y peligro de incendios forestales. Sin embargo, la acumulación también puede deberse a eventos atípicos como ventarrones, tormentas, nevadas, incendios forestales anteriores y ataque de plagas (Brower et al., 2017; Meraz, 2020). Sin embargo, la carga de combustibles

disponibles para una combustión varía de acuerdo a la topografía y vegetación dominante. Por lo que, varía el comportamiento del fuego al igual que el consumo de combustibles y los GEI emitidos a la atmósfera.

El objetivo del presente trabajo es evaluar la carga de combustibles en áreas dominadas por oyamel, pino-oyamel y pino-encino de la RBMM para predecir el comportamiento del fuego, el consumo de combustible y la emisión de GEI de acuerdo a la topografía. Esto para identificar las áreas susceptibles a incendios forestales, el potencial del fuego en dichas áreas, el consumo de combustibles y la emisión de GEI producto de los incendios forestales, así como identificar si las dominancias arbóreas de oyamel, pino-oyamel y pino-encino corresponden o no a una misma CC.

El capítulo 1 presenta la evaluación y caracterización de los combustibles forestales de acuerdo a la dominancia arbórea, ladera (norte y sur) y pendiente, ($<35^\circ>$) para identificar si corresponden o no a una misma cama de combustibles forestales (CC). Una CC es una unidad de paisaje homogéneo con un ambiente único o similar de combustión, así como de comportamiento y efecto potencial del fuego (Ottmar et al., 2007). El capítulo 2 presenta el comportamiento del fuego de la capa de hojarasca para las dominancias arbóreas mediante quemas sobre una plataforma metálica con influencia de la pendiente. Además del comportamiento del fuego de sitios muestreados en la RBMM usando el programa Fuel Fire Tools (FFT) que trae integrado el Sistema de Clasificación de Características de Combustibles (FCCS, por sus siglas en inglés). Además de presentar ecuaciones de predicción de la geometría del fuego, propagación e intensidad de línea de fuego de acuerdo a los datos obtenidos de FCCS y de las quemas.

El capítulo 3 presenta el consumo de combustibles y las emisiones de GEI de acuerdo a las quemas realizadas, así como predichas para los sitios muestreados en la RBMM usando COSNUME, integrado en FFT; también obtuvieron ecuaciones de predicción de consumo y de emisión. Finalmente, el capítulo 4 presenta la discusión de los capítulos y cómo un incendio forestal puede afectar

la RBMM; así como proponer alternativas de manejo de combustibles para reducir los efectos del fuego.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la carga de combustibles en tres dominancias arbóreas de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca y predecir el comportamiento del fuego, consumo de combustible y emisión de gases de efecto invernadero para identificar si corresponden o no a una misma cama de combustible forestal.

Objetivos específicos

1. Caracterizar y cuantificar los combustibles forestales en las dominancias arbóreas de acuerdo a las condiciones topográficas.
2. Predecir y evaluar el comportamiento del fuego en las dominancias arbóreas de acuerdo a las condiciones de pendiente.
3. Calcular el consumo de combustibles superficiales de acuerdo al comportamiento del fuego de las dominancias arbóreas.
4. Calcular las emisiones de gases de efecto invernadero emitidos por las dominancias arbóreas.
5. Generar modelos de predicción de consumo de combustibles y emisión de gases de efecto invernadero por el fuego en las dominancias arbóreas.

CAPITULO I. CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE COMBUSTIBLES FORESTALES EN TRES DOMINANCIAS ARBÓREAS

1.1. RESUMEN

Las áreas conservadas acumulan combustibles forestales que pueden aumentar el riesgo y peligro de incendios forestales. Los combustibles forestales influyen en el comportamiento del fuego y son las únicas manipulables para reducir los efectos del fuego. Por lo que es importante conocer la carga de combustibles en áreas de importancia como la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca considerando las dominancias arbóreas y la topografía para identificar el potencial del fuego. Se evaluó la carga de combustible en las dominancias arbóreas de oyamel, pino-oyamel y pino-encino presentes en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca; considerando la ladera norte y sur, y pendientes mayores y menores a 35°. Se encontró mayor carga de combustible en áreas dominadas por oyamel, con alta carga de combustibles leñosos, principalmente de combustibles >7.6 cm de diámetro, las cuales aumentaron conforme aumentó la altitud. La carga de fermentación fue mayor en áreas con pino-oyamel y la carga de hojarasca en pino-encino. Las laderas influyeron en la carga de combustible <0.6 cm de diámetro y en la hojarasca; mientras que la pendiente no influyó en la carga de combustibles. También se obtuvo que el estrato medio e inferior influyó positivamente en la carga de los combustibles leñosos; el estrato medio en la carga de arbustos; y el estrato superior en la carga de fermentación; por otra parte, la carga de hojarasca dependió de la presencia de arbustos en el sotobosque. Los resultados indican variación de carga de combustibles entre dominancias arbóreas, que dependió de las características del rodal; así también la carga de combustibles indico mayor riesgo de incendios forestales en áreas dominadas por pino-encino y pino-oyamel por la mayor carga de combustibles ligeros.

Palabras clave: Área conservada, biomasa, incendio forestal, *Pinus* sp., potencial de incendio.

1.2. ABSTRACT

The conserved areas accumulate forest fuels that can increase the risk and danger of wildfire. The forest fuels influence fire behavior and are the only ones that can be manipulated to reduce the effects of fire. Therefore, it is important to know the fuel load in important areas such as the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, while considering the tree dominance and the topography to identify fire potential. Here we evaluate the fuel load in fir, pine-fir, and pine-oak, arboreal dominance presents in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, considering the northern and southern hillsides, with slopes greater and less than 35°. We found higher fuel loads in areas dominated by fir, but with a high load of woody fuels, mainly fuels >7.6 cm in diameter, which increased as altitude increased. The fermentation load was higher in areas with pine-fir and the litter load in pine-oak. The slopes influenced the fuel load <0.6 cm in diameter and the litter, while the slope did not influence the fuel load. We also found that the middle and lower strata positively influenced the loading of woody fuels; the middle stratum in the bush load; and the upper layer in the fermentation load; on the other hand, the litter load depended on the presence of shrubs in the undergrowth. Our results indicate variation in fuel load between arboreal dominance, and according to the characteristics of the stand; as well as a greater risk of forest fires in areas dominated by pine-oak and pine-oyamel due to the greater load of light fuels.

Keywords: Conserved area, biomass, wildfire, *Pinus* sp., fire potential.

1.3. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales son fenómenos comunes en ecosistemas forestales con regímenes que están siendo alterados por cambios ambientales y antropogénicas (McColl-Gausden & Penman, 2019). Los incendios, así como tienen efectos negativos sobre los ecosistemas, en baja intensidad proporcionan

servicios ecosistémicos como la reducción de los combustibles, influir en la dinámica de los rodales, mantener la floración y la presencia de polinizadores (Pausas & Keeley, 2019). Un incendio forestal se presenta por la asociación del combustible forestal, una fuente de ignición y el oxígeno (Tappeiner et al., 2015). El combustible forestal es la biomasa viva o muerta disponible a quemarse y es el único manipulable para reducir los efectos posfuego (Keane, 2015); estas se clasifican por sus propiedades físicas de acuerdo al tipo de vegetación dominante, el tamaño, la humedad, la densidad aparente, la cantidad, la relación superficie-volumen, la carga en un área, y la continuidad vertical y horizontal (Keane, 2015; Ottmar, 2014); además de sus propiedades químicas (e.g. carbohidratos, grasas, proteínas y contenido mineral) de acuerdo al tipo y condición de combustible (Ottmar, 2014).

La cuantificación y caracterización de los combustibles forestales permite conocer la carga de combustibles para proyectar el riesgo, peligro, intensidad y severidad de incendios forestales (Castagneri et al., 2013; Gould et al., 2011). Además, aporta información para la gestión integral de incendios forestales, considerando el cambio climático, los incendios interfaz forestal-urbano, el impacto a la salud, la productividad de los bosques y la conciencia pública (Flannigan et al., 2009). La evaluación de los combustibles se puede realizar a través de CC. Una CC está integrada por los árboles, los arbustos, las herbáceas, el material leñoso caído (MLC), la capa de hojarasca, la capa de fermentación y los combustibles de escalera que dan continuidad vertical entre los combustibles superficiales y el dosel (Ottmar et al., 2007). El MLC se constituye por las partículas leñosas depositadas en el suelo y se clasifican por su diámetro, que a su vez se asocia con su tiempo de retardo (<0.6 cm=1 hora (h), 0.6-2.5=10 h, 2.6-7.6=100 h, >7.6=1000 h); el tiempo de retardo se refiere al tiempo que estas tardan en perder el 63% de la humedad inicial contenida y la humedad de equilibrio bajo condiciones ambientales (Agee, 1993; Keane, 2015).

La carga de combustibles en un área puede ser temporal, complejo y heterogéneo de acuerdo al tipo de ecosistema (Gould et al., 2011). Esto porque los ecosistemas son dinámicos y la vegetación varía de acuerdo al gradiente

ambiental (Hessburg et al., 2007; Zhang et al., 2010). De igual manera, la carga puede variar de acuerdo a la dominancia arbórea, edad del rodal, disturbios como tormentas por viento o helada y actividades de manejo como el corte de saneamiento, aprovechamiento e incluso por la presencia de incendios anteriores (Gould et al., 2011; Johnson et al., 2013; McGinnis et al., 2010).

Los eventos de disturbio influyen en la estructura y cobertura del bosque permitiendo la entrada de luz sobre los combustibles superficiales definiendo su humedad y disponibilidad para la combustión (Meraz, 2020; Quevedo et al., 2016). La estructura por su parte determina la biomasa aérea disponible a quemarse si el fuego avanza verticalmente al dosel, la cual está compuesta por el fuste, las ramas y el follaje (Flores-Garnica et al., 2018). Aunado a esto, en los bosques densos los efectos son más severos, afectando principalmente al dosel y al sotobosque, con alta mortalidad en árboles de dimensiones pequeñas (Amato et al., 2013; Cansler et al., 2020).

La carga de combustible define el comportamiento del fuego; la cual se refiere a la velocidad de propagación, la intensidad del fuego, la altura y longitud de la flama. Particularmente la hojarasca y el MLC <0.6 cm de diámetro aumentan el riesgo de un incendio forestal por su rápida ignición y propagación del fuego (Burrows, 2001; El Houssami et al., 2018); mientras que los combustibles leñosos de mayor diámetro tardan más en quemarse y en consumirse (Burrows, 2001). Sin embargo, los combustibles no siempre están disponibles para su combustión debido a su contenido de humedad; la humedad incide en la rápida o lenta descomposición de los combustibles influyendo en su acumulación, pero puede variar de acuerdo a la topografía, donde la exposición de la ladera contribuye en la cantidad de radiación recibida afectando la humedad y la descomposición de los combustibles (Fernández-Alonso et al., 2017; Ottmar, 2014).

En áreas con limitadas actividades de manejo de combustibles y con políticas de exclusión de incendios, la carga de combustible puede ser alta (Bentley & Penman, 2017; Fry et al., 2018), aumentando el riesgo de incendios forestales; tal como es el caso de la RBMM. Los incendios forestales en la RBMM van de media a baja intensidad (Cantú-Fernández, 2013; Pérez-Salicrup et al., 2016);

estas se presentan entre los meses de enero y mayo según datos facilitados por la dirección de la RBMM con alta probabilidad de ocurrencia de incendios en áreas de mayor densidad forestal (Farfán et al., 2018); áreas que coinciden con mayor número de disturbios como los ventarrones, así como actividades por saneamiento y talas. Sin embargo, los incendios se concentran en los bordes de las áreas boscosas y cercanos a los asentamientos humanos (Huitrón, 2019). La evaluación y caracterización de los combustibles de acuerdo a las dominancias arbóreas permitirá conocer las dominancias con mayor carga de combustibles de acuerdo al estrato. Esto permitirá proyectar el riesgo y peligro de los incendios forestales, el comportamiento del fuego y los efectos; además de mapear la carga de combustible (Sandberg et al., 2007), desarrollar estrategias de tratamiento de combustibles para mitigar la gravedad de los incendios forestales, planificar tácticas de prevención, supresión y uso del fuego enfocado a la ecología del fuego, y a los aspectos socioeconómicos y culturales para reducir los efectos negativos (Fernández-Alonso et al., 2017; Salis et al., 2018). Por lo que este trabajo tuvo como objetivo evaluar la carga de combustibles en tres dominancias arbóreas abordando las siguientes preguntas: i) ¿hay variación de carga de combustibles de acuerdo a la dominancia arbórea?, ii) ¿la ladera norte y sur influye en la carga de combustibles?, iii) ¿la pendiente influye en la carga de combustibles? y iv) ¿existe relación de las variables dasométricas con la acumulación de los combustibles?

1.4. MATERIAL Y MÉTODOS

1.4.1. Área de estudio

El estudio se realizó en la RBMM, ubicada entre las coordenadas 19°44'27" y 19°18'32" latitud norte y 100°22'26" y 100°09'07" longitud oeste entre los estados de México y Michoacán (Figura 1). La RBMM cubre una superficie de 56 256 ha con tres zonas núcleos (Altamirano, Chincua-Campanario-Chivati y Cerro Pelón) y dos zonas de amortiguamiento (Altamirano y Chincua-Campanario-Chivati), con altitud que van de 2200 a 3640 msnm. El clima es templado subhúmedo con

temperatura promedio anual de 8 a 22 °C y precipitación anual de 700 a 1250 mm (SEMARNAP, 2000).

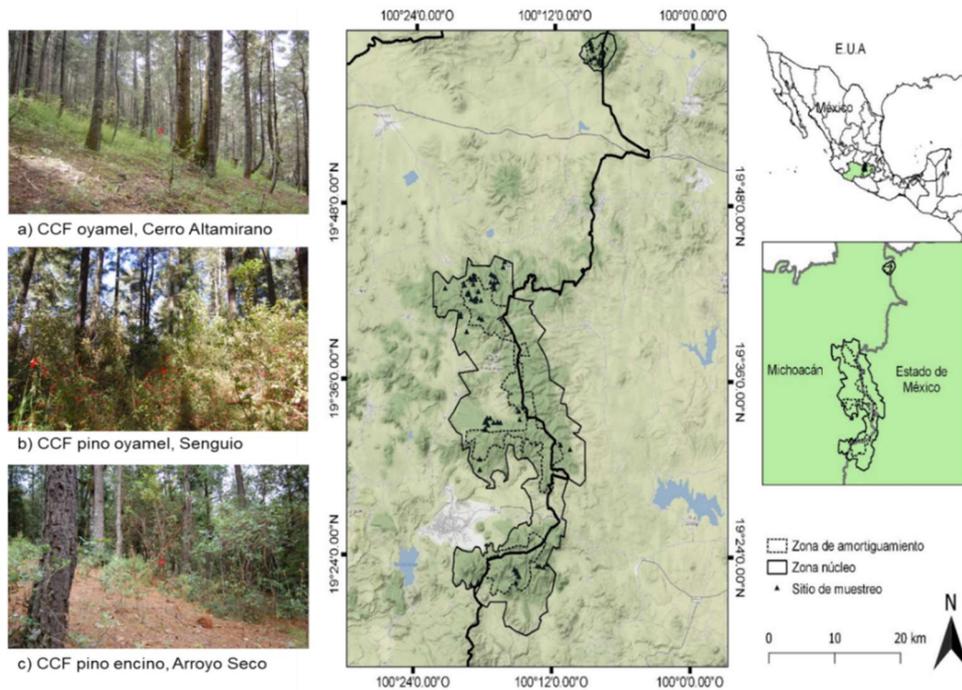


Figura 1. Ubicación del área de estudio y camas de combustibles evaluadas en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.

Para el estudio identifique áreas conservadas con dominancias arbóreas compuestas de oyamel, pino-oyamel y pino-encino mediante recorridos realizados de 2018 a 2020 entre los 1888 a 3297 msnm (Figura 1). Establecí 84 sitios (28 por dominancia arbórea) circulares concéntricas de 0.05 ha (500 m²) para la medición de los árboles mayores de 10 cm de diámetro normal y 0.005 ha (50 m²) para la regeneración; los sitios se establecieron en la ladera norte y sur en un 50% de distribución, y considerando dos grupos de pendientes (<35°). Los sitios establecidos no presentaron evidencias de cortas reciente, cambio de uso de suelo o actividad de manejo de combustibles como el acomodo de combustibles o eliminación de arbustos.

1.4.2. Medición de variables

Medí los arbustos sobre 4 líneas de 10 m establecidas en dirección de los puntos cardinales desde el centro de cada sitio establecido. En cada línea medí la longitud de intersección de la copa de los arbustos sobre la línea, la altura del arbustos y presencias de cortinas de acículas (combustibles ligeros depositadas sobre la copa) que puedan facilitar el avance vertical del fuego. El porcentaje de cobertura se calculó sumando la longitud de intersección dividido por la longitud de la recta, y la carga correspondió al peso seco del material vegetativo vivo colectado en un metro cuadrado en cada sitio.

Evalué el MLC sobre 3 líneas de intercepciones planares de 20 m de longitud orientadas a 20, 140 y 260° de azimut a partir del centro del sitio siguiendo la metodología de Brown (1974). Clasifiqué la carga del MLC por tiempo retardo. Contabilicé las partículas de 1 y 10 h en los últimos 5 m de la línea y los de 100 y 1000 h en toda la línea; para las de 1000 h medí el diámetro y las clasifiqué por su condición firme (no podrido) o podrido. El diámetro cuadrático que usé para obtener la carga la obtuve de la medición del diámetro de 15 partículas por tiempo de retardo en cada sitio de muestreo. Calculé la carga empleando las fórmulas propuestas por Van Wagner (1982).

La capa de hojarasca y la capa de fermentación las evalué en 4 cuadros de 30x30 cm por sitio, cada cuadro se estableció a 5 metros del centro del sitio sobre las líneas donde evalué los arbustos. En cada cuadro medí el grosor de cada capa, posteriormente colecté las capas, las etiqueté y las pesé. La densidad aparente de la capa de hojarasca y fermentación la obtuve al dividir el peso seco por el grosor promedio de cada capa de acuerdo al área colectada. Todas las colectas se llevaron al Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad de la UNAM, Campus Morelia para su secado a 79°C hasta obtener un peso seco constante. Las cargas de la capa de hojarasca y capa de fermentación las obtuve al multiplicar el grosor de cada capa por la densidad aparente dividida por el área de colecta (Morfín-Ríos et al, 2012).

Identifiqué la especie o género de los árboles y medí el DN (diámetro a 1.3 m del suelo), la altura total del árbol (H), la altura de la primera rama o de fuste limpio

(AFL) y el diámetro de copa (DC). Para el caso de los *Quercus* sp., *Pinus* sp. y *Arbutus* sp. no identifique taxonómicamente las especies, por lo que solo registré el nivel de género. Calculé el área basal (AB), además de la biomasa aérea de cada árbol empleando ecuaciones alométricas disponibles de trabajos cercanos a nuestra área de estudio (Andrade-Calva & Arias-Perugachi, 2016; Graciano-Ávila et al., 2019; Rojas-García et al., 2015) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Ecuaciones alométricas empleadas para calcular la biomasa aérea de las especies encontradas en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.

Especie	Ecuación
<i>Abies religiosa</i>	$B = 0.0713 * DN^{2.2104}$
<i>Alnus acuminata</i>	$B = \text{Exp}-1.967 * DN^{2.189}$
<i>Pinus</i> sp.	$B = 0.084 * DN^{2.475}$
<i>Quercus</i> sp.	$B = 0.0342 * DN^{2.759}$
<i>Arbustus</i> sp.	$B = 0.3764 * DN^{-2.3146} * DN^{-1.9106}$
<i>Buddleja cordata</i>	$B = 260.343 * DN^{0.9068}$
<i>Ceanothus caeruleus</i>	$B = 0.311733 * DN^{2.04754}$
<i>Cupresus lusitanica</i>	$B = 0.2637 * DN^{0.796}$
<i>Cupresus arizonica</i>	$B = 0.2637 * DN^{1.7698}$
<i>Clethra mexicana</i>	$B = \text{Exp}-1.9 * DN^{2.15}$

1.4.3. Análisis de datos

Probé los supuestos de normalidad y varianza con la prueba de Lilliet y Levene, respectivamente; cuando no se cumplieron los supuestos se transformaron logarítmicamente. Comparé las medias empleamos un ANOVA de tres vías con los factores: dominancia arbórea (oyamel, pino-oyamel, pino-encino), ladera (norte y sur) y pendiente (<35°>). Al encontrar diferencias significativas ($p < 0.05$) realicé pruebas de interacción bidireccional de efecto principal simple y comparaciones simples por pares. Realicé un análisis de proporcionalidad de la estructura vertical del dosel considerando conjuntamente las tres dominancias arbóreas; definiendo 3 estratos o zonas de altura con base a la altura máxima encontrada (Amax): superior) alturas >80 % de la altura máxima, medio) de 50 a 80 % de la altura máxima, e inferior) <50 % de la altura máxima (Pretzsch, 2009). Realicé un análisis de redundancia (RDA) para relacionar los combustibles con las variables dasométricos, la estructura del bosque y la topografía de la RBMM.

1.5. RESULTADOS

1.5.1. Estructura forestal

La densidad arbórea no presentó variación entre dominancia arbórea (Cuadro 2); pero, sí en la H ($F_{2,72}=4.57$, $p=0.014$), DN ($F_{2,72}=4.52$, $p=0.014$) y DC ($F_{2,72}=3.31$, $p=0.042$); Las mayores dimensiones fueron en áreas dominadas por oyamel y pino-oyamel (Cuadro 2). La ladera influyó en la H ($F_{1,72}=8.22$, $p=0.005$), AFL ($F_{1,72}=11.87$, $p=0.001$), DN ($F_{1,72}=8.83$, $p=0.004$), AB ($F_{1,72}=17.27$, $p<0.001$) y biomasa aérea por hectárea ($F_{1,72}=12.48$, $p=0.001$), con mayores dimensiones en la ladera norte. En el caso de la pendiente no encontré ningún efecto.

Cuadro 2. Valores promedios de las variables descriptivas de las dominancias arbóreas evaluadas. Dens= Densidad (Arb ha⁻¹), H= Altura (m), AFL= Altura de fuste limpio (m), DN= Diámetro normal (cm), DC= Diámetro de copa (m), AC= Área de copa (m²), AB= Biomasa aérea (Ton ha⁻¹).

	Oyamel	Pino-oyamel	Pino-encino	Norte	Sur	<35°	>35°
Arboles ≥7.5 cm de DN							
Dens	419(275)	284(143)	412(202)	360(208)	384(233)	364(203)	380(238)
H	21.8(6.6)	22.1(5.5)	18.1(5.1)	22.4(5.8)	19.0(5.8)	20.6(5.5)	20.8(6.5)
AFL	7.0(3.7)	8.3(3.5)	6.7(3.0)	8.6(3.3)	6.1(3.1)	7.2(3.3)	7.5(3.6)
DN	32.0(14.1)	37.6(15.0)	27.6(9.9)	36.5(12.4)	28.4(13.7)	32.7(14.0)	32.1(13.4)
DC	6.5(2.1)	7.7(1.6)	6.8(1.9)	7.4(2.0)	6.6(1.8)	7.3(2.0)	6.7(1.8)
AC	42.1(27.4)	58.1(22.0)	45.7(26.1)	52.6(27.2)	45.0(24.2)	52.2(27.0)	45.1(24.6)
AB	36.2(21.1)	37.7(19.5)	28.0(15.7)	41.4(20.5)	26.6(14.4)	33.5(17.7)	34.4(20.7)
B	250.0(163.4)	272.0(163.0)	205.7(126.9)	295.1(164.4)	190.0(120.5)	250.0(136.6)	244.2(169.0)
Regeneración (DN<7.5 cm)							
Dens	51(94)	45(101)	33(57)	41(86)	44(86)	41(65)	44(103)
H	8.0(2.8)	7.8(2.5)	5.6(2.6)	6.4(2.3)	8.0(3.0)	7.1(2.7)	7.4(3.0)
AFL	2.3(1.8)	1.5(0.8)	1.6(0.6)	2.0(1.0)	1.6(1.5)	1.9(1.5)	1.7(1.0)
DN	6.4(0.8)	5.7(1.6)	6.2(1.0)	6.0(0.9)	6.2(1.4)	6.2(1.0)	6.0(1.4)
DC	2.6(0.6)	2.9(1.7)	2.2(0.8)	2.3(1.0)	2.9(1.2)	2.6(1.4)	2.6(0.9)
AC	7.1(4.6)	8.9(9.4)	4.8(3.2)	5.1(4.1)	8.7(7.7)	7.1(7.6)	7.1(5.3)
AB	0.2(0.3)	0.1(0.3)	0.1(0.2)	0.1(0.3)	0.2(0.3)	0.1(0.2)	0.1(0.4)
B	0.4(0.8)	0.3(0.9)	0.2(0.4)	0.2(0.6)	0.4(0.8)	0.3(0.4)	0.3(1.0)

Hubo efecto de interacción entre las dominancias arbóreas y pendiente en DN ($F_{1,72}=3.53$, $p=0.035$), indicando variación entre pendientes en oyamel ($p=0.029$).

De la misma manera en AB ($F_{1,72}=6.12$, $p=0.004$) y biomasa aérea ($F_{1,72}=5.12$, $p=0.008$), variando entre pendientes en pino-oyamel ($p=0.013$ y $p=0.014$, respectivamente). La densidad de la regeneración fue similar en las tres dominancias arbóreas, con H mayor en oyamel ($F_{1,72}=3.70$, $p=0.039$), así como mayor H en la ladera sur, $F_{1,72}=4.26$, $p=0.049$ (Cuadro 2). El análisis de proporcionalidad indicó que la densidad correspondió en un 9% al estrato I con H mayores de 32 m, 27% al estrato II con H de 20 a 32 m y 63% al estrato III con H menores de 20 m (Cuadro 3). Para el DN encontré mayormente individuos menores de 30 cm de diámetro, principalmente en oyamel (Figura 2).

Cuadro 3. Valores promedios de las variables descriptivas de las dominancias arbóreas evaluadas por estrato en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.

Variable	Estrato I	Estrato II	Estrato III
Altura (m)	36.65 (2.79)	26.85 (3.07)	12.05 (4.84)
Altura de fuste limpio (m)	13.32 (5.89)	10.15 (4.81)	3.58 (3.03)
Diámetro normal (cm)	59.89 (18.37)	42.36 (15.10)	15.13 (8.93)
Diámetro de copa (m)	10.54 (3.46)	8.22 (3.05)	4.61 (2.43)
Área de copa (m ² árbol)	96.58 (57.50)	60.25 (44.04)	21.35 (23.48)
Área basal (m ² ha ⁻¹)	616.06 (360.32)	317.61 (228.57)	48.48 (62.75)
Biomasa (Ton ha ⁻¹)	48.96 (36.71)	22.39 (20.88)	2.82 (7.65)

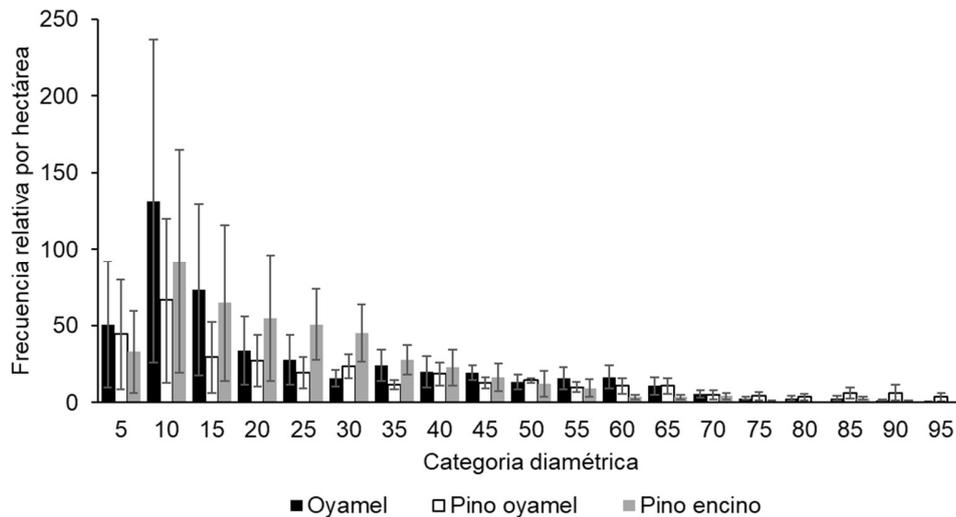


Figura 2. Distribución de la categoría diamétrica de las dominancias arbóreas de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.

1.5.2. Arbustos

La altura promedio de los arbustos fue mayor en pino-encino (1.05 m) seguida por oyamel (0.81 m) y pino-oyamel (0.77 m), $F_{2,72}=5.81$, $p=0.005$. La altura entre ladera no vario, con 0.89 y 0.79 m en la ladera norte y sur, respectivamente. En pendientes más pronunciadas la altura fue mayor que en pendientes menores a 35° , $F_{1,72}=13.64$, $p<0.001$ (Figura 3).

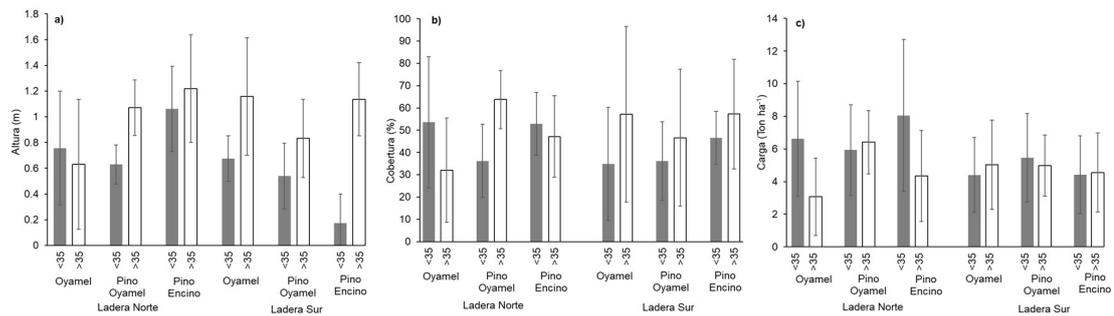


Figura 3. a) Altura, b) cobertura y c) carga de arbustos en dos condiciones de pendiente y ladera de las dominancias arbóreas de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.

La cobertura promedio de arbustos no vario entre dominancia arbórea, ladera y pendiente; la cobertura fue de 51, 46 y 45% en pino-encino, pino-oyamel y oyamel, respectivamente; para la ladera norte y sur fue de 48 y 46%, respectivamente, mientras que en pendientes $<35^\circ$ la cobertura fue de 43 y 51%, respectivamente. La carga promedio de arbustos no varió entre dominancia arbórea, ladera y pendiente; la carga fue de 5.70, 5.35, 4.78 Ton ha⁻¹ en pino-oyamel, pino-encino y oyamel, respectivamente. La carga fue de 5.74 y 4.83 Ton ha⁻¹ para la ladera norte y sur, respectivamente; mientras que en pendientes $<35^\circ$ fue de 5.82 y 4.73 Ton ha⁻¹, respectivamente.

1.5.3. Material leñoso caído

La carga del MLC fue hasta del 75% de la carga de combustibles del sotobosque (Figura 4), de la cual el combustible de 1000 h conformó de 36 a 64% del MLC (Cuadro 4). Por categoría hubo variación ($p<0.05$) entre dominancia arbórea en los MLC de 1 y 10 h, con mayor carga en pino-encino, mientras que las de 100 y

1000 h no variaron entre dominancia arbórea, pero su presencia aumentó considerablemente la carga total (Cuadro 4).

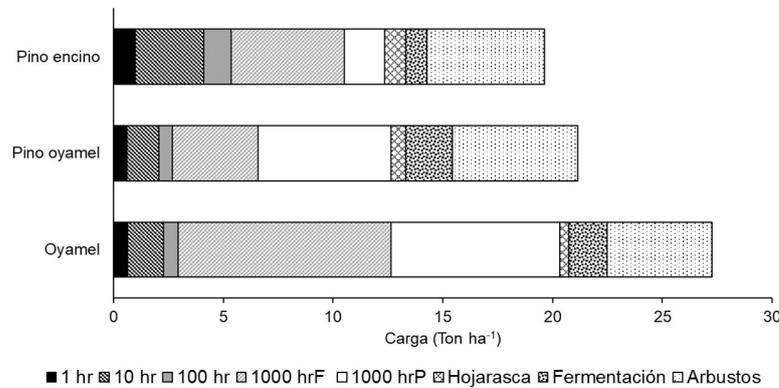


Figura 4. Carga promedio de combustibles en el sotobosque por estrato en las dominancias arbóreas de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.

Cuadro 4. Carga promedio del MLC, capa de hojarasca y fermentación en laderas norte y sur de las dominancias arbóreas evaluadas. El p y F son estadísticos obtenidos de la comparación entre dominancias arbóreas.

	1 h	10 h	100 h	1000 h F	1000 h P	Total MLC	Hojarasca	Fermentación
Oyamel								
Media	0.6(0.4)	1.6(1.4)	0.7(0.9)	9.7(23.0)	7.7(20.6)	20.3(36.2)	0.4(0.2)	1.9(0.7)
LN	0.55(0.44)	1.49(1.36)	0.51(0.35)	8.64(14.66)	9.67(27.16)	20.85(42.17)	0.41(0.23)	1.75(0.59)
LS	0.71(0.46)	1.77(1.52)	0.85(1.28)	10.75(29.70)	5.71(11.76)	19.79(30.82)	0.33(0.18)	1.95(0.78)
Pino-oyamel								
Media	0.6(0.4)	1.5(1.1)	0.6(0.8)	3.9(9.1)	6.1(10.3)	12.6(15.1)	0.7(0.2)	2.1(0.8)
LN	0.55(0.48)	1.31(1.05)	0.75(1.00)	6.21(11.64)	8.67(12.82)	17.49(18.13)	0.82(0.23)	1.98(0.79)
LS	0.66(0.41)	1.61(1.24)	0.47(0.54)	1.63(5.00)	3.44(6.41)	7.80(9.62)	0.54(0.14)	2.25(0.83)
Pino-encino								
Media	1.0(0.5)	3.1(3.3)	1.2(1.4)	5.2(18.0)	1.8(6.0)	12.4(19.5)	1.0(.3)	1.5(1.0)
LN	0.84(0.46)	2.46(1.33)	1.57(1.70)	8.94(25.15)	2.65(8.07)	16.46(26.80)	0.94(0.29)	1.84(1.18)
LS	1.12(0.58)	3.81(3.28)	0.90(1.09)	1.38(2.48)	1.05(2.76)	8.26(5.97)	0.97(0.28)	1.21(0.69)
p	0.002	0.003	0.049	0.389	0.103	0.750	<0.001	0.009
F	6.46	6.06	2.83	1.15	2.48	1.78	54.07	4.21

La orientación de la ladera infirió solo en la carga del MLC de 1 h, siendo mayor en la ladera sur (0.83 Ton ha^{-1}) que en la ladera norte (0.65 Ton ha^{-1}), $F_{1,72}=4.90$, $p=0.030$. No hubo variación en los MLC mayores de 10 h, pero si una alta carga

de combustibles de 1000 h, principalmente en áreas con oyamel (Figura 5). No encontré variación de la carga entre pendientes menores y mayores a 35°.

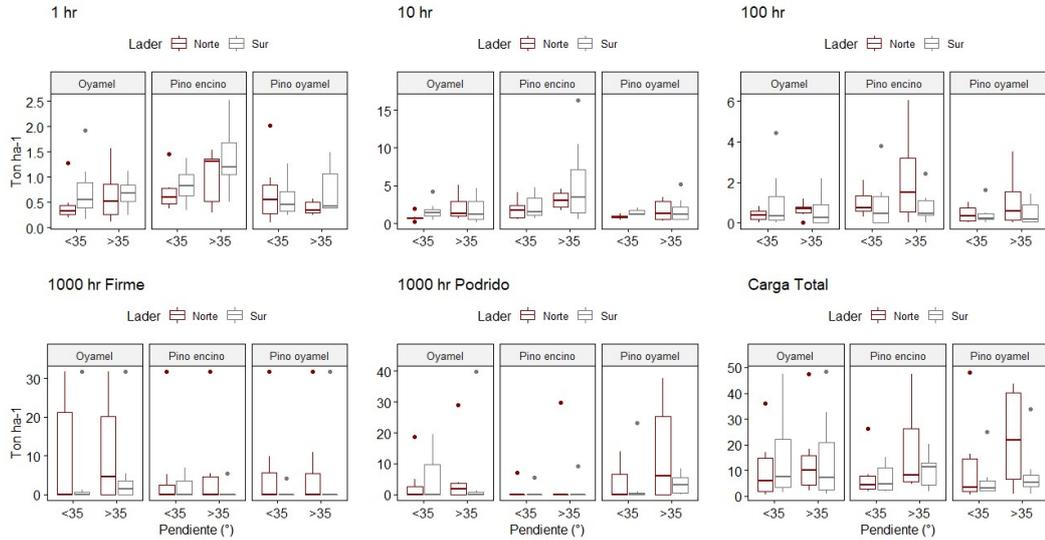


Figura 5. Diagrama de caja y bigotes de las cargas de las partículas de MLC de acuerdo a pendientes, ladera y dominancia arbórea.

1.5.4. Capa de hojarasca y fermentación

La cobertura, el grosor y carga de la capa de hojarasca varió entre dominancia arbórea ($F_{1,72}=9.30$, $p<0.001$; $F_{1,72}=32.57$, $p<0.001$; $F_{1,72}=54.07$, $p<0.001$, respectivamente). La cobertura de hojarasca fue de 97, 90 y 65% en pino-encino, pino-oyamel y oyamel, respectivamente, correlacionando con el DN y H de los árboles. El grosor de la capa de hojarasca fue mayor en pino-encino (3.4 cm) seguida por pino-oyamel (2.1 cm) y oyamel (1.1 cm). La carga siguió la misma tendencia del grosor de la capa de hojarasca (Cuadro 4).

La ladera no difirió en el grosor y cobertura de las hojarasca, pero sí en la carga ($F_{1,72}=6.24$, $p=0.015$) con 0.73 y 0.61 Ton ha⁻¹ en la ladera norte y sur, respectivamente (Cuadro 4). La pendiente solo influyó en el grosor de la hojarasca siendo mayor en pendientes >35° que en pendientes <35° ($F_{1,72}=12.32$, $p=0.001$) con 2.65 y 1.74 cm, respectivamente (Figura 6a). Encontré interacción entre dominancia arbórea y ladera para la carga ($F_{2,72}=3.55$, $p=0.034$), variando entre laderas en pino-oyamel ($p=0.001$). También encontré interacción de tres vías en el grosor de hojarasca ($F_{2,72}=0.28$, $p=0.048$), con variación ($p<0.001$) de

0.7 cm entre pendientes en la ladera norte de pino-oyamel; así como en la carga ($F_{2,72}=0.800$, $p=0.016$) con variación ($p=0.030$) de 0.153 Ton ha⁻¹ entre pendientes en la ladera sur de pino-oyamel.

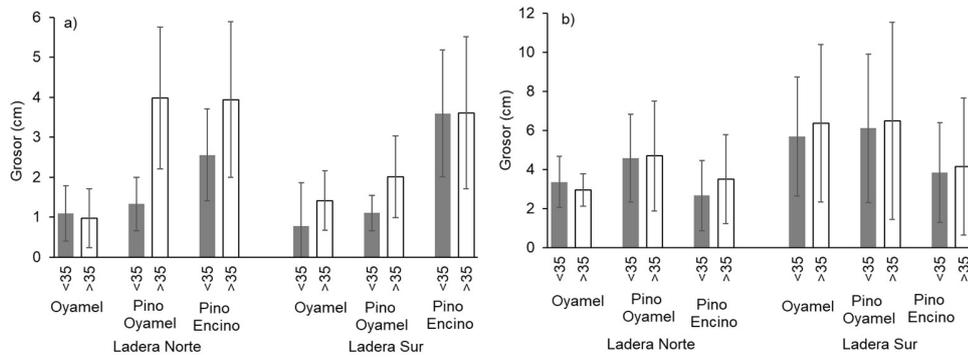


Figura 6. a) Grosor promedio de la capa de hojarasca y b) grosor de la capa de fermentación en pendientes mayores y menores de 35° y en las laderas norte y sur de las dominancias arbóreas evaluadas.

El grosor, la cobertura y la carga de la capa de fermentación difirió entre dominancia arbórea ($F_{1,72}=4.21$, $p=0.019$; $F_{1,72}=3.91$, $p=0.025$; $F_{1,72}=5.06$, $p=0.009$, respectivamente). La cobertura fue del 100, 97 y 97% en pino-oyamel, oyamel y pino-encino, respectivamente; el grosor fue de 5.5, 4.6 y 3.5 cm, respectivamente; la carga siguió la misma tendencia del grosor (Cuadro 4). En la ladera sur el grosor de la fermentación fue de 5.43 cm, 3.62 cm mayor que la ladera norte, $F_{2,72}=5.63$, $p=0.020$. La pendiente no influyó en el grosor, cobertura y carga de fermentación (Figura 6b, Cuadro 4).

1.5.5. Relación multivariante de combustibles

El análisis de componentes principales (ACP) indicó que los 2 primeros componentes explican el 40.4% de la variabilidad de los datos (Figura 7a). El primer componente presentó mayor contribución y correlación de la carga de arbustos, MLC 10 y 100 h, mientras que el componente 2 explica el mayor peso de los MLC de 1 y 1000 h firme. Las cargas se agruparon de acuerdo a las dominancias arbóreas con ligera superposición de la especie dominante. El MLC <1000 h, los arbustos, y la capa de hojarasca están separados positivamente a

la dominancia arbórea de pino-encino indicando su mayor dispersión (Figura 7a). El MLC de 1000 h y la capa de fermentación correlacionaron y fueron independientes de la carga de hojarasca y los MLC <100 h. La carga de arbustos y MLC de 100 h están muy relacionados e independientes del MLC de 1 h.

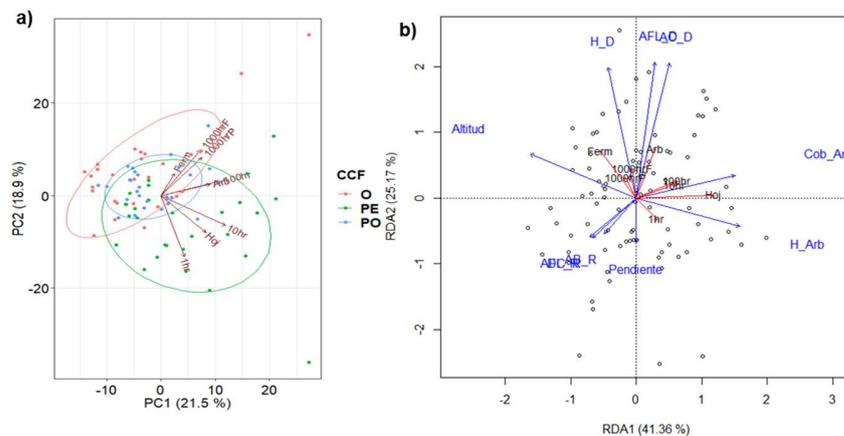


Figura 7. Relaciones biplot de: a) análisis de componentes principales (ACP) como variables (carga de combustibles por estrato) y unidad experimental (dominancia arbórea); y b) ordenación de análisis de redundancia (RDA); flechas rojas: variables de respuesta (MLC, arbustos, capa de hojarasca y fermentación); flechas azules: predictores (altura total de dosel (H_D), altura de fuste limpio de dosel (AFL_D), área de copa de dosel (AC_D), altura de fuste limpio de regeneración (AFL_R), diámetro de copa de regeneración (DC_R), área basal de regeneración (AB_R), cobertura de arbusto (Cob_Arb), altura de arbustos (H_Arb), altitud y pendiente).

El análisis de redundancia (RDA), empleando la carga de combustible, la estructura forestal y la topografía; eliminando la colinealidad al omitir los predictores con valores de inflación de la varianza (VIF) >10, obtuve un modelo ($p=0.001$) que explica el 66.5% de la varianza en los dos primeros RDAs. El RDA fue consistente con el ACP al indicar que la carga del MLC de 1000 h y la capa de fermentación fue mayor en áreas dominadas por oyamel. Además, la carga fue mayor en áreas con árboles de mayor altura y decreció con la altura de arbustos (Figura 7b). Mientras que la carga arbustos, MLC de 10 y 100 h aumentaron con la cobertura de arbustos, la AFL y el AC del dosel, pero disminuyeron con la regeneración. Por otra parte, la carga de hojarasca aumentó con la mayor cobertura y altura de los arbustos y decreció a mayor altitud. El MLC de 1 h respondió ligeramente al aumento de la pendiente y la altura del arbusto.

1.6. DISCUSIÓN

1.6.1. Carga de combustibles por estrato

La RBMM presentó alta carga de combustibles leñosos, mayor que en áreas no protegidas de bosque de encino y bosque templado en el sur y norte de México (Calleja-Peláez et al., 2020; Rubio et al., 2017). Esto podría indicar que la limitada actividad del manejo de combustibles en los bosques conservados de la RBMM favorece su acumulación; además, la presencia de árboles con diámetro mayores de 42 cm en el estrato medio y superior podría indicar presencia de árboles de mayor edad, la cual junto al área basal influyen en la deposición de combustible (Fry et al., 2018; Hille & Den Ouden, 2005).

Ciertamente las actividades de aprovechamiento forestal son permitidas solo en la zona de amortiguamiento, donde los MLC pueden ser manipulados o extraídos como actividades de control de residuos por la corta reduciendo su acumulación (SEMARNAT, 2009b). Sin embargo, la tala ilegal afecta la RBMM (Brower et al., 2016; Navarrete et al., 2011), y puede indicar alta carga de MLC al eliminar los árboles de mayores tamaños dejando sus residuos; al igual, la presencia de eventos atípicos como la tormenta del 2016 acompañado de vientos que rompieron las ramas de los árboles y redujeron la densidad del arbolado en las áreas de pino y oyamel de la zona núcleo (Brower et al., 2017; Meraz, 2020).

La carga de los MLC <10 h puede deberse a la presencia de árboles con ramillas rotas y secas transferidas a la superficie, producto de daños al dosel a causa de viento, lluvia o nevadas (Cannon et al., 2014; Fry et al., 2018). De la misma manera, en áreas de oyamel la carga de MLC fino puede ser resultado de la ramificación; ya que se ha encontrado relación directa de la carga del MLC <100 h con el área basal del *Abies* sp. (Cansler et al., 2019; Lydersen et al., 2015). La carga del MLC pesado en áreas con oyamel es porque está distribuida en el área más conservada de la reserva donde la extracción no es permitida, lo cual no sucede en la zona de amortiguamiento con pino-encino, donde es permitido el aprovechamiento forestal y la colecta del MLC como leña para el autoconsumo de las comunidades (Ramírez et al., 2019; Salgado-Terrones et al., 2017).

La variación del grosor y la carga de la capa de hojarasca y de fermentación en las dominancias arbóreas indican variación del comportamiento superficial del fuego, debido a que los combustibles finos superficiales contribuyen a la intensidad y propagación del fuego (Cansler et al., 2019). La mayor carga de la capa de hojarasca en las áreas de pino-encino y pino-oyamel reflejan la producción del bosque (Ivanova et al., 2020), donde la longitud de las acículas de los pinos aumenta la probabilidad de la combustión flameante; mientras que en el área de oyamel la combustión puede ser principalmente latente si el fuego llega a la capa de fermentación, lo cual puede presentar consumo de combustibles sustanciales y mayor mortalidad de plantas (Kreye et al., 2017). Aun cuando la carga de la capa de hojarasca es baja en la RBMM, el 40% de la reserva tiene pendientes mayores a 20° y más conservadas (Carlón-Allende et al., 2015), condición que puede aumentar los efectos de los incendios forestales, ya que la pendiente y el comportamiento del fuego tienen una relación directa (Sánchez-Monroy et al., 2019; Taylor et al., 2020).

1.6.2. Relación de la estructura forestal con la carga de combustibles

Los resultados indican que los estratos arbóreos y las variables dasométricas tienen relación con la carga de combustibles. Resultado similar se ha encontrado en bosques de *Pinus jeffreyi* Balf. en Baja California, donde la biomasa aérea y la presencia de árboles de mayores dimensiones aportan cantidades considerables de combustibles a la superficie (Fry et al., 2018), indicando que la estructura del bosque es un predictor de agregación de combustibles a la superficie. De la misma manera, la abertura de la copa contribuye en el crecimiento de los arbustos y en la variación de combustibles disponibles influyendo en el comportamiento del fuego (Lydersen et al., 2015; Ng et al., 2020; Wang et al., 2021). Por ejemplo, Hanberry et al. (2018) encontraron que en coberturas abiertas de pino y encino el incendio forestal afecta desproporcionadamente la vegetación del sotobosque.

La distribución del arbusto aun cuando su altura no alcanza la base del dosel para el avance vertical del fuego, puede influir en la presencia de combustibles

de escalera, debido a que en áreas de mayor cobertura puede haber agujas y ramillas suspendidas en la copa de los arbustos aumentando la probabilidad del avance vertical del fuego. Para el caso de la RBMM, la presencia de arbustos de mayor altura en pendientes pronunciados indica mayor intensidad del fuego en el área, influyendo en mayor mortalidad de los árboles de menor área basal como encontraron Taylor et al. (2020). Por lo tanto, en áreas con distribución heterogénea del estrato vertical es más probable tener mayor comportamiento del fuego y mayor efecto de los incendios (Cansler et al., 2019; Fry et al., 2018). Además, la estructura del bosque influye en la carga de combustibles ligeros, pero no en la descomposición (Fry et al., 2018), por lo que se puede encontrar mayor acumulación de los combustibles.

1.6.3. Carga de combustibles y riesgos de incendios

La baja densidad de árboles en la RBMM reduce la probabilidad de incendio de copa. Así también, la mayor precipitación en mayores altitudes en las que se distribuye oyamel en la RBMM (España-Boquera et al., 2019) puede influir en la descomposición y disponibilidad de combustibles a quemarse en un incendio forestal superficial. Esto podría atribuirse a la menor cantidad de combustible ligero encontrado en el área dominado por oyamel ya que su descomposición es rápida por la humedad presente. Por lo tanto, la baja carga de combustibles ligeros en áreas con oyamel y la mayor precipitación puede reducir la intensidad del fuego como menciona Collins et al. (2014), que a medida en que aumenta la precipitación la intensidad de fuego es baja. Por lo tanto, la severidad del fuego puede ser baja en áreas de mayor altitud, sin embargo, cuando la cobertura del dosel es alta se vuelve susceptible a incendios de alta severidad (Grabinski et al., 2017; Harris et al., 2021; Harris & Taylor, 2017).

Por otra parte, la alta carga del MLC de 1000 h puede aumentar el efecto de los incendios forestales debido que influyen en la combustión en flamas desarrollando una lenta combustión (Kreye et al., 2014). Esto podría pasar en el área de oyamel donde se encontraron cargas hasta de 157.5 Ton ha⁻¹, que en

caso de incendiarse el tiempo para su combustión total va a ser larga afectando mayormente al suelo por la liberación de calor en un mismo lugar.

En la RBMM los incendios se concentrarían en áreas de menor altitud dominada por pino y encino, área donde encontramos mayor carga de combustibles ligero; los cuales favorecen el comportamiento del fuego. Sin embargo, en áreas con encino hay una ventaja, ya que sus hojas reducen el comportamiento del fuego por su menor flamabilidad en comparación a las acículas de los pinos; lo que ha hecho que los encinos se han implementado como franjas verdes de prevención de incendios (Wang et al., 2021).

Por otro lado, la presencia de arbustos y la alta densidad de árboles pequeños aumenta la severidad de los incendios (Grabinski et al., 2017), lo cual podría indicar mayor intensidad del fuego en áreas con presencia de árboles de menor tamaño y con ramas a baja altura que pueden servir como combustible de escalera; principalmente en pendientes pronunciadas donde es mayor la altura de la vegetación arbustiva. Por lo que, en la RBMM un incendio forestal superficial causaría daños al dosel por la radiación y convección, así como alta mortalidad de la regeneración ya que el calor lograría penetrar la corteza delgada de los árboles jóvenes (Cruz et al., 2017; Rodríguez et al., 2019).

Para reducir los riesgos es importante considerar actividades de tratamiento de combustibles como la poda y el raleo en áreas con alta densidad de árboles y baja AFL. Esto con el objetivo de eliminar los combustibles de escalera y romper la continuidad vertical del combustible; además de aumentar la altura de la base del dosel en áreas con arbustos altos y reducir la intensidad del fuego, así como la probabilidad de alcance de las flamas a la copa (Agee & Skinner, 2005; Cruz et al., 2017). Esto debido a que las actividades de tratamiento de combustibles como el aclareo, masticación, quemas prescritas o la combinación de tratamientos han tenidos resultados positivos logrando reducir la severidad del fuego y el tamaño del incendio forestal (Cochrane et al., 2012; Cruz et al., 2017; Harris et al., 2021; McKemey et al., 2021). De la misma manera, según Regos et al. (2016) la extracción de la biomasa forestal reduce los combustibles, probablemente esto tenga relación con la baja intensidad de los incendios en las

zonas de amortiguamiento de la RBMM, sin embargo, sería interesante saber cómo influyen las áreas de aprovechamiento forestal en la carga de combustibles post corta y la presencia de incendios forestales.

Para aplicar los tratamientos de combustibles es importante conocer la distribución de combustibles y el potencial del fuego en el área de interés. Sin embargo, es importante considerar que las actividades como la poda o los aclareos aumentan la carga después de la actividad para luego disminuir por la descomposición del material (Cruz et al., 2017; Johnston et al., 2021). Además, es importante mantener las áreas con dominancia mixta de especies forestales debido a que la acumulación de hojarasca mixta puede reducir el comportamiento del fuego; mientras que en áreas dominadas de pino es mayor el riesgo y peligro de incendios. De igual manera es importante identificar los árboles y arbustos menos flamables presentes en la RBMM para emplearlas en reforestaciones sobre las áreas con alta intensidad del fuego para reducir el comportamiento del fuego en un incendio forestal.

1.7. CONCLUSIÓN

La carga de MLC de menor diámetro, capa de hojarasca y fermentación fueron diferentes entre dominancias arbóreas; con alta carga de combustibles pesados en las tres dominancias arbóreas. La ladera influyó en la carga del MLC de 1 h y de hojarasca; la pendiente no influyó en la carga, pero si en la altura de los arbustos y grosor de hojarasca. La carga del combustible pesado y la capa de fermentación son mayores en áreas de oyamel que corresponde a la zona de mayor conservación. Las áreas con mayor cobertura y densidad de árboles del estrato medio e inferior presentaron mayor carga de combustibles leñosos; mientras que la carga de la capa de fermentación y de arbustos fue mayor en áreas con estrato medio a superior; la hojarasca respondió a la presencia de arbustos. La estructura forestal de la dominancia arbórea influye en la variación de la carga de combustibles; y la necesidad de diferentes estrategias de manejo y tratamiento de combustible para reducir la carga en áreas con riesgo de avance vertical del fuego y reducir los efectos del fuego.

CAPÍTULO II. COMPORTAMIENTO DEL FUEGO EN TRES DOMINANCIAS ARBÓREAS

2.1. RESUMEN

Los combustibles forestales y la pendiente son determinantes para la propagación del fuego. El objetivo de este estudio fue evaluar el comportamiento del fuego de acuerdo a la pendiente en tres dominancias arbóreas. Se realizaron quemas de camas de acículas sobre tres condiciones de pendiente para obtener el comportamiento del fuego. También, se obtuvo el comportamiento considerando todos los estratos del sotobosque usando Fuel Fire Tools (FFT). Se aplicaron modelos semi-empíricos considerando la relación entre la velocidad de propagación, longitud de flama e intensidad de línea de fuego. Se encontró variación ($p < 0.05$) del comportamiento del fuego entre las dominancias arbóreas tanto en la quema de acículas y los obtenidos por FFT. La pendiente y la carga de acículas prequemadas influyeron en la intensidad, altura y longitud de la flama; la velocidad de propagación únicamente influyó en la pendiente. Los estratos del sotobosque aumentaron el comportamiento del fuego e intensidad. La propagación y geometría del fuego correlacionaron permitiendo desarrollar modelos lineales con mejor r^2 al considerar la pendiente, la carga prequemada y un variable ambiental. La concordancia de la velocidad de propagación y longitud de flama permitió un mejor ajuste del modelo exponencial para los datos de FFT, mientras que con las quemas de acículas se obtuvo mejores ajustes para la intensidad de línea de fuego. El sotobosque, de acuerdo a su altura, combinada con la pendiente influyen en el comportamiento del fuego aumentando el riesgo del avance vertical del fuego.

Palabras clave: Geometría de la flama, incendio forestal, longitud de flama, modelo semi-empírico, propagación del fuego.

2.2. ABSTRACT

The forest fuel and the slope determine the fire spread. Thus, the objective of this study was to evaluate the fire behavior according to the slope in three forest fuelbeds. Needle bed burns were carried out on three slope conditions to obtain the fire behavior. Also, the behavior was obtained considering all the understory strata using Fuel Fire Tools (FFT). Semi-empirical models were applied on the relation of the fire spread, flame length, and intensity of the line of fire. Variation ($p < 0.05$) was found in the fire behavior between arboreal dominance, both in the burning of needles and those obtained by FFT. The slope and the load pre-burned needles positively influenced the height and length of the flame, and intensity, while the propagation speed only influenced the slope. The understory strata increased the behavior of fire and the intensity. The propagation and geometry of the fire correlated, allowing the development of linear models with better r^2 when considering the slope, the pre-burned load, and an environmental variable. The agreement of the propagation speed and flame length allowed a better fit of the exponential model with the FFT data, while with needle burns better adjustments were obtained for the intensity of the line of fire. The understory, according to its height combined with the slope, influences the behavior of the fire, increasing the risk of the vertical advance of the fire.

Keywords: Flame geometry, forest fire, flame length, semi-empirical model, fire spread.

2.3. INTRODUCCIÓN

Un incendio forestal es el fuego no estructural y fuera de control desarrollada en un área con vegetación, la cual puede ser causada rayos, actividad volcánica, accidente o de forma antropogénica (Miloua, 2019); además es un fenómeno que afecta los ecosistemas (Matsypura et al., 2018) con impactos que dependen del régimen de incendios (Francos et al., 2018). Sin embargo, el fuego ha sido parte integral del ecosistema influyendo en la evolución de las plantas (Matsypura et al., 2018).

El comportamiento del fuego en un incendio forestal es el resultado de la interacción de la topografía, el tiempo atmosférico, la carga y condición del combustible (Fernández-Alonso et al., 2017). La pendiente influye exponencialmente en la propagación del fuego, aumentando la inclinación de la flama, así como la radiación del calor hacia los combustibles sin quemar (Morandini et al., 2018). Por ejemplo, se tiene conocimiento que a partir de los 20° de pendiente hay un cambio considerable en el comportamiento del fuego formando un frente en forma de V (Morandini et al., 2018; Tihay et al., 2014).

El tiempo atmosférico influye en el comportamiento del fuego, principalmente en el contenido de humedad de los combustibles definiendo el tiempo de ignición (McAllister et al., 2012); la velocidad y la dirección del viento son parámetros críticos y variables que influyen en el comportamiento del fuego (Miloua, 2019). La interacción entre la pendiente y la velocidad del viento cuesta arriba induce a aumentar la inclinación de las flamas acelerando la propagación del fuego; de la misma manera la altura de los estratos del sotobosque interfiere en la velocidad del viento aumentando el comportamiento del fuego (Andrews, 2012; Oliveira et al., 2014; Yang & Chen, 2018).

Los combustibles forestales distribuidas horizontal y verticalmente forman un umbral de propagación del fuego (Cruz et al., 2013; Davies et al., 2009); la elevada carga del combustible, y su flamabilidad aumenta la longitud de la flama agrandando la intensidad de línea de fuego (Alexander & Cruz, 2017; Kreye et al., 2014). Para la ignición de los combustibles, influyen las propiedades químicas y las características físicas de los combustibles como la carga, la profundidad, la altura y la densidad aparente (Gould et al., 2011; Keane, 2015; McAllister et al., 2012; Pettinari & Chuvieco, 2017). Además, la baja conductividad térmica de los combustibles finos, al estar sujetos a niveles altos de calor experimentan evaporación y pirólisis simultáneamente creando gradientes de temperatura facilitando su ignición y combustión en flama (Burrows, 2001; McAllister et al., 2012); por lo que la capa de hojarasca es una de las principales determinantes de la propagación del fuego (Kreye et al., 2020).

La variación de CC, la edad, la distribución del arbolado, permiten una heterogeneidad en la acumulación de combustibles influyendo en la variación de la densidad aparente afectando en diferentes alturas y longitudes de la flama en un incendio (Alexander & Cruz, 2017). La longitud de la flama tiene una relación directa con la intensidad de línea del fuego determinando la transferencia de calor por unidad de longitud de línea, e indicando el consumo de combustibles (Keeley, 2009). Por lo que la intensidad puede tener impacto negativo en las personas, en la vida silvestre y en el medio ambiente (Matsypura et al., 2018).

El efecto posquemado depende del régimen de incendio, el ecosistema, la topografía y las condiciones atmosféricas donde se desarrolla el incendio (Francos et al., 2018). Estas condiciones en conjunto influyen en la temperatura liberada y duración de la combustión afectando la mortalidad de los árboles (Kreye et al., 2017), además de daños biológicos al suelo (mortalidad de raíz, hongos, bacterias y semillas), daños químicos (pérdida de humedad, aumento de pH, formación de carbonato e hidróxido) y físicos (modificación de la estabilidad agregada del suelo, alteración de la filtración) (Kreye et al., 2017; Moody et al., 2013; Santín & Doerr, 2016; Santín et al., 2016).

El comportamiento del fuego se predice considerando la interacción entre las condiciones ambientales, la geometría de la línea de fuego y el consumo de combustibles de acuerdo al calor liberado (Cruz et al., 2013; Morandini et al., 2005; Ottmar et al., 2016). Los métodos de predicción pueden ser empíricos, mediante observaciones y estimaciones con un enfoque operativo (Rossa & Fernandes, 2018), así como por métodos físicos y químicos para comprender la interacción de los componentes involucrados durante la combustión (Rossa & Fernandes, 2018) y semi-empíricos que combinan los dos enfoques.

El modelaje del comportamiento del fuego, relacionando la velocidad de propagación, la longitud de flama y la energía liberada permite identificar el riesgo de incendios de acuerdo a los combustibles. Con esto se busca mejorar la planificación y la gestión de los incendios forestales, definiendo tratamiento hacia los combustibles y actividades de extinción de los incendios (Andrews, 2014; Rossa & Fernandes, 2018). Se han definido modelos de predicción de acuerdo a

los combustibles del sotobosque, como es el modelo estándar de ajuste de la energía liberada en función de la longitud de flama establecido por Byram (1959). También se han probado modelos con buenos ajuste para la propagación del fuego como las aplicadas por Alexander y Cruz (2012), Canfield et al. (2014), Cruz et al. (2013) y Davies et al. (2019). Por lo que, el objetivo del trabajo fue conocer el comportamiento del fuego de acuerdo al pendiente empleado camas de acículas, así como integrando los estratos del sotobosque de tres dominancias arbóreas de la RBMM. Además de ajustar modelos que aporten información del comportamiento del fuego de acuerdo a la carga de combustibles, permitiendo conocer las condiciones de mayor riesgo y peligro de incendios.

2.4. MATERIAL Y MÉTODOS

2.4.1. Quema de acículas forestales

2.4.1.1. Diseño de lecho de combustibles

Se usaron combustibles compuestos de acículas de oyamel, pino-oyamel y pino-encino colectados en la RBMM. En cada dominancia arbórea se colectaron 18 muestras de 1 m² omitiendo los conos o combustibles leñosos debido a que el interés es conocer el comportamiento del fuego para la capa de hojarasca. Las muestras se colocaron en bolsas y se transportaron al Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad de la UNAM, Campus Morelia, Michoacán. Posteriormente se secaron en un horno a 79°C para obtener su peso seco. Las muestras en condición seca se quemaron sobre una plataforma metálica resistente al calor de 225x50 cm; los primeros 25 cm de longitud de la plataforma correspondió a un buffer compuesta de acículas de pino (Figura 8a).

La plataforma se montó a una altura de 13 cm del suelo, con soportes en un extremo permitiendo inclinar la plataforma a 0, 10 y 20°, y 6 réplicas en cada condición de pendiente. Se colocaron postes graduados de 1 metro a los 45, 120 y 195 cm de la longitud de la plataforma para distinguir la altura de la flama. Se colocó una cámara digital Nikon D5300 perpendicular a la longitud de la

plataforma para registrar el comportamiento del fuego y la geometría de la flama (altura, longitud y ángulo) (Figura 8b).

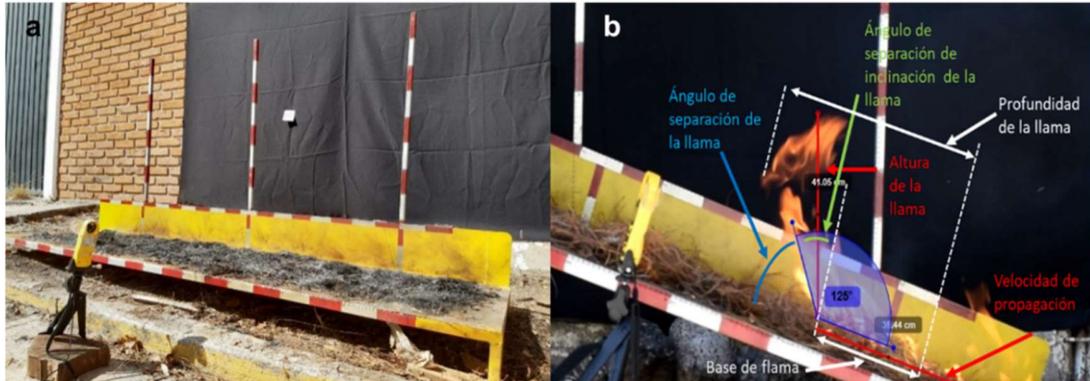


Figura 8. Plataforma metálica de medición del geometría y comportamiento el fuego.

2.4.1.2. Quema de combustibles

Se realizaron 54 quemas de camas de acículas en los meses de enero y febrero del 2021 de 10 a 15 hr del día en las instalaciones de la Conafor-Morelia, Michoacán. Los combustibles se extendieron uniformemente sobre la plataforma y se comprimieron a mano para lograr un grosor homogéneo. La ignición se inició en el búfer del borde inicial de la plataforma. Durante la quema no se controló la temperatura ambiental, humedad relativa y velocidad del viento, por lo que estas se registraron usando un medidor meteorológico de bolsillo Kestrel ®3000; el promedio la velocidad del viento fue de 2 km hr⁻¹, 29°C de temperatura y 36% de humedad relativa.

2.4.1.3. Medición de comportamiento del fuego

La longitud recorrida por el fuego sobre la plataforma correspondió a 200 cm perpendicularmente al borde encendido. Los parámetros de geometría de la flama se midieron cada 5 segundos en videos grabados usando el programa Kinovea, de acceso libre. La velocidad de propagación del fuego se calculó a partir del momento en que la flama consumió el búfer e inició con la cama de acículas hasta alcanzar la longitud final de la plataforma o apagarse. El índice de la línea de fuego se calculó empleando la fórmula de Byram (1959).

$$IR = HwROS$$

Donde:

IR= Intensidad de línea de fuego (kW m^{-1})

H= Calor de combustión ($18608 \text{ kJ kg}^{-1} = 8000 \text{ BTU lb}^{-1}$)

w= Masa de combustible consumida (kg m^2)

ROS= Tasa de propagación (m min^{-1})

2.4.2. Comportamiento del fuego por Fuel Fire Tools

Se emplearon datos de cargas de combustibles de 28 sitios muestreados por cada dominancia arbórea sumando un total de 84 sitios. Los datos contemplan el dosel y los estratos del sotobosque que influyen en el comportamiento del fuego (Cuadro 5). Se uso FFT que integra FCCS versión 4.0 para obtener el potencial del fuego, la tasa de propagación, la longitud de la flama y la intensidad de línea de fuego. Se emplearon los escenarios de humead de combustibles predeterminados en el programa, y recomendadas para zonas templadas húmedas o subhúmedas por Jardel-Peláez et al. (2018) y Drury et al. (2014) (Cuadro 6). Se uso la pendiente de cada sitio muestreado, la velocidad de viento correspondió al promedio más cercano del mes de mayo de 2021 (5 km hr^{-1}) según las estaciones más cercanas del Sistema Meteorológico Nacional (SNM).

Cuadro 5. Parámetros de entrada de las camas de combustibles forestales en Fuel Fire Tools.

Estratos	Variables
Dosel (estrato superior, medio e inferior, arboles muertos)	Cobertura, altura, altura de fuste limpio, densidad, cobertura por especie, combustibles de escalera (altura máxima, altura mínima, especie, continuidad), cobertura relativa por especie. Categorías de árboles muertos (con follajes secos, sin follaje y con ramillas, con ramas gruesas, podridos sin corteza).
Arbustos	Cobertura, altura, porcentaje vivo, presencia de aguja de acículas, carga, cobertura relativa por especie o género.
Herbáceas	Cobertura, altura, porcentaje vivo, carga, cobertura relativa por especie o género.
Combustible leñoso	Carga por categoría del material leñoso caído (1, 10, 100, 1000 h), cobertura, grosor, cobertura por especie. Tocón firme o podrido (altura, diámetro, densidad, cobertura relativa por especie). Pilas (altura, largo, ancho, composición por especie).
Capa de hojarasca	Cobertura, grosor, arreglo (normal, esponjoso, en parches o islas), cobertura relativa por especie, carga.

Cuadro 6. Escenario de contenido de humedad de los combustibles vivos y muertos (%) para la predicción del potencial del fuego predeterminados en Fuel Fire Tools.

	Humedad en combustibles muertos			Humedad en combustibles vivos		
	1 h	10 h	100 h	Herbáceas	Arbustos	Dosel
Muy baja (D2L1)	6	7	8	30	60	60
Baja (D2L2)	6	7	8	60	90	60
Moderada (D2L3)	6	7	8	90	120	60
Alta (D2L4)	6	7	8	120	150	90

2.4.3. Análisis de datos

Para el análisis de datos, se omitió la cama de acícula de oyamel, debido a que no se quemaron por la poca cantidad de combustible evitando que el fuego avanzara después del búfer. La normalidad y varianza se probaron empleando la prueba de Lilliefors y la prueba Bartlett modificada, respectivamente. Cuando no se cumplieron los supuestos, los datos se transformaron en logarítmicos. Se realizó un ANOVA para comparar la geometría del fuego y la velocidad de propagación entre dominancia arbórea y pendiente. Para todos los análisis se consideró un nivel de significancia estadística de $\alpha=0.05$. Se empleó una prueba de comparación post-hoc de Tukey para determinar las diferencias entre pendientes usando Rstudio (Rstudio Team, 2020). Para los datos de FFT se comparó el comportamiento del fuego entre dominancia arbórea mediante un ANOVA y el análisis post hoc de Tukey si había variación.

Se realizó la correlación de Pearson para ver la relación entre variables geométricas de la flama, para posteriormente aplicar regresiones lineales mixtos para generar ecuaciones predictoras del comportamiento del fuego de acuerdo a las variables geométricas, pendiente, y la carga de hojarasca antes de la quema. Para desarrollar los modelos se emplearon los datos obtenidos de las quemas y de FFT. Se usó la transformación logarítmica de la velocidad de propagación para el ajuste de un modelo exponencial. Para el índice de línea de reacción se usó el modelo potencial estándar propuesto por Byram (1959). Los modelos son las siguientes.

$$ROS = a * FL^b \exp(-c*FL)$$

$$FL = aIR^b$$

Donde:

ROS= es la velocidad de propagación

FL= es la longitud de la flama

IR es el índice de reacción

a, b, c= son los predictores obtenidos de ajuste.

2.5. RESULTADOS

2.5.1. Comportamiento superficial y geometría del fuego por acículas

Durante las quemas las condiciones atmosféricas no variaron entre camas de acículas quemadas (Cuadro 7). Entre pino-encino y pino-oyamel fue diferente la velocidad de propagación ($F_{1,31}=7.526$, $p=0.010$), la altura de la flama ($F_{1,31}=5.453$, $p=0.026$), longitud de la flama ($F_{1,31}=5.937$, $p=0.020$), intensidad de línea de fuego ($F_{1,31}=5.409$, $p=0.026$) a excepción del ángulo de la flama.

Cuadro 7. Características de los combustibles quemados y tiempo atmosférico del ambiente durante las quemas. CC= dominancia arbórea o cama de combustible forestal a la que corresponde la cama de acículas, O= oyamel, PE= pino-encino, PO= pino-oyamel, ϕ = pendiente de inclinación de la plataforma de quema, w = carga de acículas, DA= densidad aparente, U = velocidad del viento, T = temperatura ambiental, HR = humedad relativa ambiental, \bar{x} = media, sd = desviación estándar.

CC	ϕ (°)	w (kg m ²)		δ (mm)		DA (kg m ³)		U (km hr ⁻¹)		T (°C)		HR (%)	
		\bar{x}	sd	\bar{x}	sd	\bar{x}	sd	\bar{x}	sd	\bar{x}	sd	\bar{x}	sd
O	0	0.35	0.08	7.50	0.58	4.67	1.39	3.47	1.37	25.57	2.73	25.00	0.00
O	10	0.04	0.01	7.60	0.55	0.48	0.13	1.95	0.20	30.91	0.47	55.00	0.00
O	20	0.21	0.16	8.86	2.67	2.20	1.30	2.84	1.33	28.96	2.76	35.29	15.92
PE	0	0.70	0.17	14.38	3.11	4.87	0.61	2.88	1.56	26.94	2.90	19.50	7.01
PE	10	0.39	0.21	13.50	2.74	2.78	0.98	2.14	1.87	28.51	2.72	45.00	15.49
PE	20	0.56	0.25	10.83	3.19	5.29	2.29	2.58	0.67	30.56	3.88	35.00	0.00
PO	0	0.50	0.22	10.92	3.26	4.39	1.04	1.70	0.29	25.96	1.58	20.50	4.93
PO	10	0.33	0.05	14.75	2.09	2.24	0.36	1.38	0.63	32.41	2.60	55.00	0.00
PO	20	0.71	0.29	15.00	4.18	4.72	1.44	2.68	0.69	28.43	5.40	35.00	0.00

La pendiente influyó significativamente en el comportamiento y geometría del fuego (Cuadro 8), aumentando rápidamente en pendientes de 20° para

posteriormente decrecer exponencialmente. En pendiente de 0 y 10°, la propagación no varió estabilizándose después de los primeros segundos (Figura 9). En las tres pendientes de todas las camas de acículas, las quemas presentaron mayor comportamiento del fuego en los primeros 100 segundos.

Cuadro 8. Comportamiento del fuego en las camas de acículas de tres dominancias arbóreas de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca en tres condiciones de pendiente. n= número de muestras quemadas por pendiente, sd= desviación estándar.

CC	Variable	0 (n= 18)	Pendiente 10 (n= 18)	20 (n= 18)	General	<i>p value</i>
Oyamel	Tasa de propagación (m min ⁻¹)					-
	Mean (sd)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.26 (0.29)	0.12 (0.23)	
	Rango	0.0 - 0.0	0.0 - 0.0	0.00 - 0.71	0.0 - 0.71	
	Altura de flama (m)					-
	Mean (sd)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.03 (0.04)	0.01 (0.03)	
	Rango	0.0 - 0.0	0.0 - 0.0	0.0 - 0.09	0.0 - 0.09	
	Longitud de flama (m)					-
	Mean (sd)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.04 (0.05)	0.02 (0.03)	
	Rango	0.0 - 0.0	0.0 - 0.0	0.0 - 0.12	0.0 - 0.12	
	Ángulo de separación de flama (°)					-
	Mean (sd)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	42 (41)	18 (34)	
	Rango	0.0 - 0.0	0.0 - 0.0	0.0 - 90	0.0 - 90	
Pino- encino	Intensidad de línea de fuego (kW m ⁻¹)					-
	Mean (sd)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	16.57 (23.98)	7.25 (17.38)	
	Rango	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-59.52	0.0-59.52	
	Tasa de propagación (m min ⁻¹)					0.002
	Mean (sd)	0.23 (0.18)	0.39 (0.18)	0.68 (0.38)	0.41 (0.31)	
	Rango	0.04 - 0.45	40.23 - 0.73	0.24 - 1.33	0.04 - 1.33	
	Altura de flama (m)					0.452
	Mean (sd)	0.09 (0.09)	0.13 (0.06)	0.12 (0.08)	0.11 (0.08)	
	Rango	0.02 - 0.26	0.06 - 0.23	0.01 - 0.19	0.0 - 0.264	
	Longitud de flama (m)					0.565
	Mean (sd)	0.1 (0.08)	0.14 (0.07)	0.12 (0.08)	0.12 (0.07)	
	Rango	0.03 - 0.25	0.06 - 0.25	0.03 - 0.21	0.03 - 0.25	
Pino- oyamel	Ángulo de separación de flama (°)					0.011
	Mean (sd)	93 (1)	90 (11)	72 (12)	86 (16)	
	Rango	78 - 124	70 - 100	55 - 88	5 - 124	
	Intensidad de línea de fuego (kW m ⁻¹)					0.027
	Mean (sd)	23.41 (28.63)	31.04 (28.42)	71.88 (80.63)	40.24 (51.84)	
	Rango	0.27-75.81	6.36-81.20	9.50-231.57	0.27-231.57	
	Tasa de propagación (m min ⁻¹)					0.001
	Mean (sd)	0.40 (0.15)	0.46 (0.17)	1.18 (0.59)	0.65 (0.48)	
	Rango	0.18 - 0.59	0.28 - 0.75	0.71 - 2.18	0.18 - 2.18	
	Altura de flama (m)					0.003
	Mean (sd)	0.11 (0.05)	0.16 (0.04)	0.23 (0.08)	0.16 (0.08)	
	Rango	0.05 - 0.16	0.11 - 0.22	0.15 - 0.37	0.05 - 0.37	
Longitud de flama (m)					0.001	
Mean (sd)	0.11 (0.05)	0.17 (0.04)	0.25 (0.09)	0.17 (0.08)		
Rango	0.05 - 0.17	0.13 - 0.23	0.17 - 0.39	0.05 - 0.39		
Pino- oyamel	Ángulo de separación de flama (°)					0.036
	Mean (sd)	84 (6)	90 (10)	66 (14)	80 (14)	
	Rango	77 - 90	71 - 96	43 - 77	43 - 96	
	Intensidad de línea de fuego (kW m ⁻¹)					0.003
Mean (sd)	35.31 (20.40)	32.35 (14.16)	121.51 (45.23)	59.62 (49.01)		
Rango	10.63-56.28	16.44-49.81	61.30-174.75	10.63-174.75		

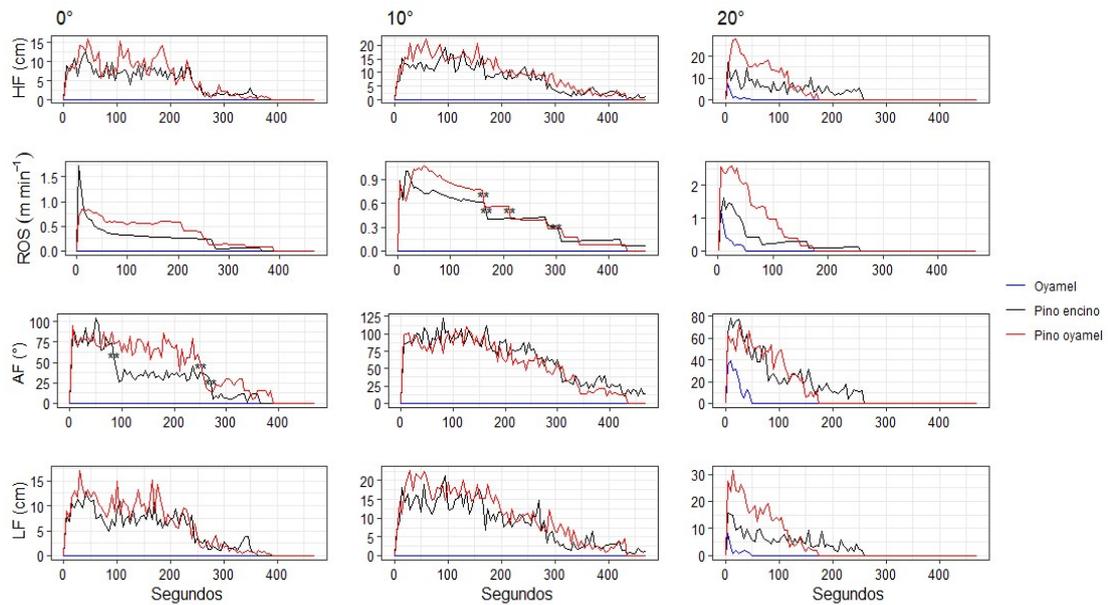


Figura 9. Altura de la flama (HF), velocidad de propagación (ROS), ángulo de flama (AF) y longitud de flama (LF) de la capa de acículas de tres dominancias arbóreas en tres condiciones de pendiente. **= Efecto de muestras apagadas sin terminar la longitud de la plataforma sobre el promedio de la cama de combustibles forestal.

Al inicio de la quema, aumentó la velocidad de propagación; sin embargo, en algunas pruebas, el fuego se apagó antes de concluir la longitud de la plataforma por la falta de continuidad de combustibles. El ángulo de separación de la flama con los combustibles no quemados se redujo al aumentar la pendiente; en pendientes de 0 y 10° la flama fue casi vertical, mientras que en pendiente de 20° fue menor a 66° permitiendo que la inclinación y longitud de la flama aumentara la velocidad de propagación recorriendo la longitud de la plataforma en un tercio de tiempo menos que en pendientes menores a 20° (Figura 9). En la cama de pino-oyamel sobresalieron las geometrías de la flama, mientras que en pino-encino las hojas de los encinos crearon islas sin quemar, así como velocidades intermitentes y reducción del tamaño de la geometría de la flama en los últimos segundos antes de alcanzar el final de la cama de acículas (Figura 9).

2.5.2. Correlación de variables geométricas del fuego

La pendiente correlacionó positivamente con la velocidad de propagación (pino-oyamel $r=0.66$, $p=0.003$; pino-encino $r=0.62$, $p=0.003$), longitud de la flama (pino-

oyamel $r=0.71$, $p=0.001$; pino-encino $r=0.14$, $p=0.565$), altura de flama (pino-oyamel $r=0.67$, $p=0.003$; pino-encino $r=0.18$, $p=0.452$) e intensidad de línea de fuego (pino oyamel $r=0.70$, $p=0.001$; pino-encino $r=0.39$, $p=0.092$); mientras que el ángulo de separación de la flama correlacionó negativa y significativamente (pino-oyamel $r=-0.51$, $p=0.036$; pino-encino $r=-0.55$, $p=0.011$).

En pendientes pronunciadas la flama presentó mayor cercanía con los combustibles pre-quemados, además la longitud de flama pudo favorecer la rápida pérdida de humedad permitiendo el avance del fuego. La influencia de la carga de acículas correlacionó con la altura y longitud de flama e índice de línea de fuego en pino-oyamel, pero no con el avance del fuego y ángulo de la flama. En camas de acículas de oyamel, la influencia de la carga fue significativa, sin embargo, hay que tener en cuenta, que solo en el 25% de las muestras el fuego avanzó después del búfer (Figura 10).

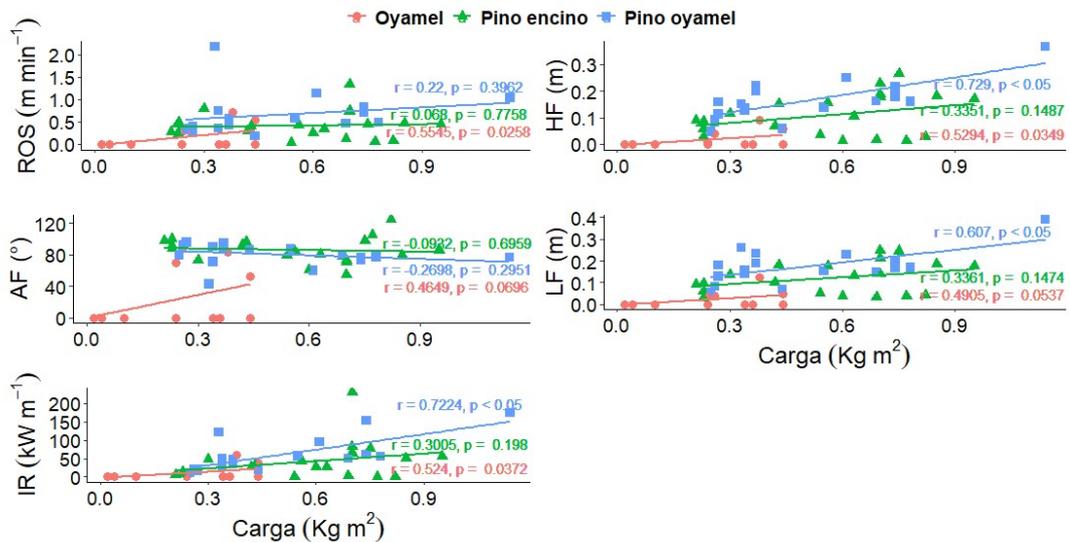


Figura 10. Grafica de dispersión y coeficientes de correlación para el comportamiento del fuego en las tres dominancias arbóreas evaluadas. ROS= velocidad de propagación, HF= altura de flama, AF= ángulo de flama, LF= longitud de flama, IR= intensidad de línea de fuego.

2.5.3. Efecto de los estratos en el comportamiento superficial del fuego

Usando FFT obtuve variación entre dominancias arbóreas en la tasa de propagación ($F_{2,330}=48.314$, $p<0.001$), longitud de la flama ($F_{2,330}=61.902$,

$p < 0.001$) e intensidad de línea de fuego ($F_{2,330} = 21.540$, $p < 0.001$) (Figura 11). Los escenarios de humedad influyeron significativamente en el comportamiento del fuego, aumentando de acuerdo a la reducción de la humedad de los combustibles (Cuadro 9). La intensidad de línea de fuego se vio influenciado por los arbustos liberado de 52 a 77% del total de intensidad (Figura 12). La tasa de propagación y la altura de flama correlacionaron con la altura de los estratos del sotobosque indicando que la presencia de estas aumenta la longitud de flama y la intensidad de línea de fuego (Cuadro 10).

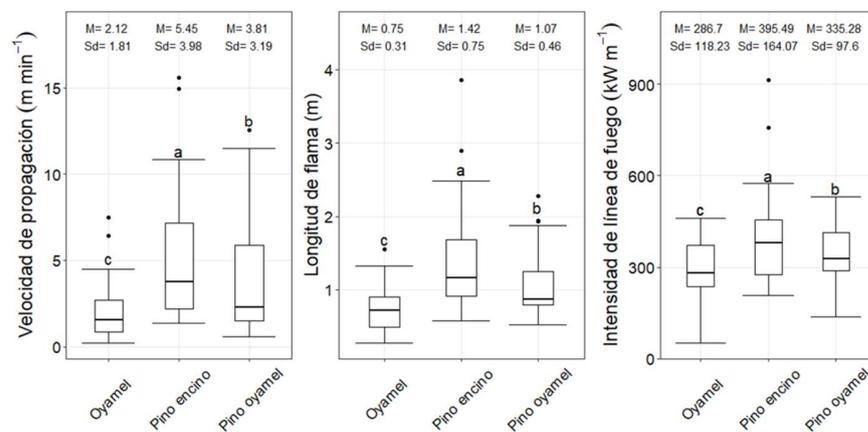


Figura 11. Variación en velocidad de propagación, longitud de flama e intensidad de línea de fuego de las dominancias arbóreas de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. Las letras indican los resultados de las pruebas por pares post-hoc.

Cuadro 9. Comportamiento el fuego en las dominancias arbóreas evaluadas de acuerdo a los cuatro escenarios de humedad, por Fuel Fire Tools.

Escenario	Tasa de propagación (m min ⁻¹)	Longitud de flama (m)	Intensidad de línea de fuego (Kw m ⁻¹)
Oyamel			
Muy baja	2.92 (2.84)	0.91 (0.42)	338.48 (144.08)
Baja	2.32 (2.03)	0.81 (0.34)	312.22 (130.91)
Moderada	1.88 (1.51)	0.71 (0.29)	283.29 (116.54)
Alta	1.34 (0.98)	0.55 (0.22)	212.83 (82.50)
Pino-oyamel			
Muy baja	4.29 (3.23)	1.20 (0.47)	382.90 (113.12)
Baja	3.92 (2.18)	1.12 (0.47)	358.77 (105.10)
Moderada	3.65 (3.20)	1.04 (0.47)	332.20 (96.57)
Alta	3.38 (3.28)	0.91 (0.47)	267.25 (78.00)
Pino-encino			

Muy baja	5.59 (3.92)	1.50 (0.74)	440.52 (177.35)
Baja	5.45 (3.98)	1.45 (0.75)	417.44 (169.61)
Moderada	5.39 (4.02)	1.41 (0.75)	392.19 (161.82)
Alta	5.38 (4.03)	1.33 (0.75)	331.83 (150.44)

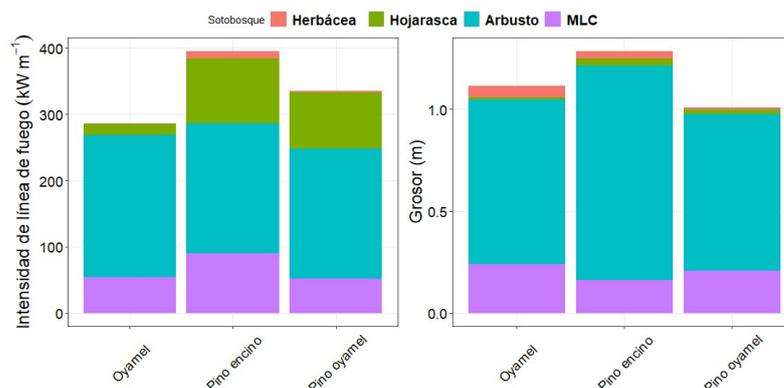


Figura 12. Intensidad de línea de fuego y grosor (altura) de estratos en las dominancias arbóreas evaluadas.

Cuadro 10. Correlación del grosor de los estratos con la tasa de propagación, longitud de flama e intensidad de línea de fuego.

Estratos	Tasa de propagación		Longitud de flama		Intensidad de línea de fuego	
	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>
Arbusto	0.51	<0.001	0.44	<0.001	-0.07	0.170
Herbácea	0.01	0.827	0.01	0.793	0.11	0.039
MLC	0.29	<0.001	0.26	<0.001	0.03	0.613
Hojarasca	0.75	<0.001	0.71	<0.001	0.17	0.002
Fermentación	0.46	<0.001	0.39	<0.001	-0.01	0.799

2.5.4. Regresión del comportamiento del fuego por acículas

Las regresiones presentaron modelos sin colinealidad entre las variables con un VIF menor a 2.3. Los modelos lineales para la propagación presentaron r^2 mayores a 56 y 57 en pino-oyamel y pino-encino, respectivamente (Cuadro 11); el r^2 mejoró al considerar una variable del tiempo atmosférico. El ajuste lineal y las predicciones coincidieron entre los datos observados y predichos, con mayor dispersión de los puntos al aumentar el valor de las variables (Figura 13). Para la dominancia arbórea oyamel el número de quemas no fue representativo para

generar modelos, debido a que solo se quemaron 3 de un total de 18 muestras. En la altura y longitud de flama las validaciones presentaron comportamientos similares, lo cual es lógico por la relación existente entre ambas variables.

Cuadro 11. Modelos lineales múltiples predictores de la geometría del fuego en las dominancias arbóreas. ROS= tasa de propagación del fuego (m min^{-1}), HF= altura de la flama (m), AF= ángulo de separación de la flama al combustible pre-quemada ($^{\circ}$), DA= densidad aparente (kg m^3), IR= Intensidad de línea de fuego (kW m^{-1}), LF= longitud de la flama (m), ϕ = pendiente ($^{\circ}$), w= carga de acículas (kg m^2), HR= humedad relativa (%), δ = grosor de la capa de acículas (mm), U= velocidad del viento (km hr^{-1}), T= temperatura ambiental ($^{\circ}\text{C}$).

CC	No.	Ecuación	r	r ²	RMSE	p-value
Pino-	1	$\text{Log}(\text{ROS}) = 0.457 + 0.026(\phi) - 0.006(\text{HR})$	0.62	0.56	0.14	<0.001
oyamel	2	$\text{HF} = 0.082 + 0.003(\phi) + 0.330(\text{w}) - 0.030(\text{DA})$	0.85	0.81	0.03	<0.001
	3	$\text{AF} = -13.776 - 1.958(\phi) + 28.818(\log(\text{HR})) + 22.480(\text{w})$	0.67	0.59	7.77	0.002
	4	$\text{LF} = 0.095 + 0.007(\phi) + 0.179(\text{C}) - 0.040(\text{U})$	0.75	0.69	0.04	<0.001
	5	$\text{IR} = 94.323 + 130.662(\text{w}) + 3.738(\phi) - 52.685(\delta)$	0.82	0.78	20.33	<0.001
Pino-	6	$\text{ROS} = -0.870 + 0.018(\phi) + 0.045(\text{T}) + 0.222(\log(\text{w}))$	0.64	0.57	0.18	<0.001
encino	7	$\text{HF} = -0.47 + 0.273(\text{w}) + 0.126(\log(\text{HR}))$	0.45	0.39	0.06	0.006
	8	$\text{AF} = 117.167 - 1.05(\phi) - 3.435(\text{DA}) - 2.705(\text{U})$	0.55	0.47	10.43	0.001
	9	$\text{LF} = -0.376 + 0.243(\text{w}) + 0.107(\log(\text{HR}))$	0.38	0.31	0.06	0.016
	10	$\text{IR} = -59.349 + 2.155(\phi) + 18.363(\text{DA})$	0.58	0.46	35.09	0.002

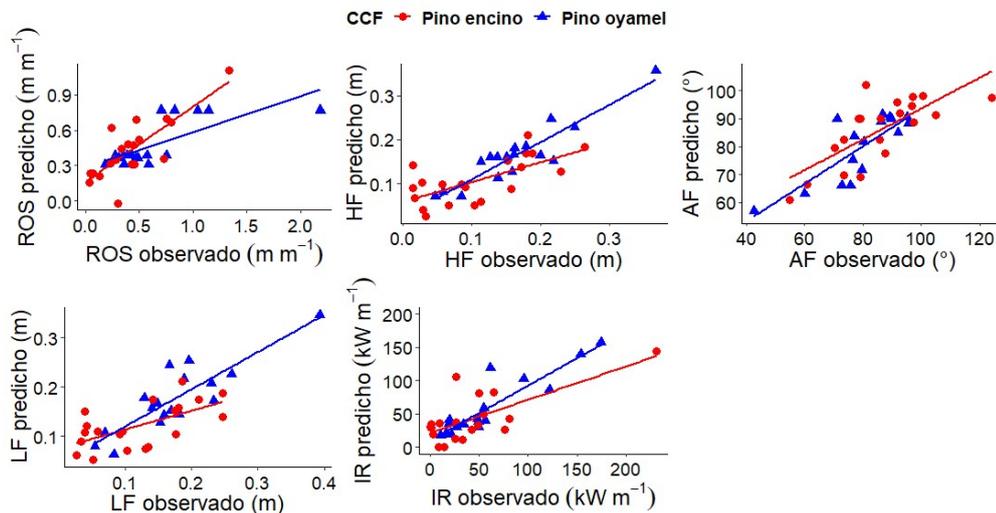


Figura 13. Propagación del fuego (ROS) y geometría del fuego observada vs predicha para los datos obtenidos en las quemas. Para ROS se presentan los modelos 1 y 6 del cuadro 5; 2 y 7 para altura de flama (HF); 3 y 8 en AF y 4 y 9 para la longitud de flama (LF); 5 y 10 para la intensidad de línea de fuego (IR).

2.5.5. Regresión de comportamiento del fuego en el sotobosque

La tasa de propagación e intensidad de línea de fuego de las quemas de acículas correlacionaron alta y medianamente, con la longitud de la flama ($r=0.91$, $p<0.001$; $r=0.47$, $p<0.001$). El ajuste de la tasa de propagación en función de la longitud de la flama presentó mayor r^2 con los datos del FFT que las obtenidas de las quemas de acículas (Cuadro 12); mientras que la longitud de flama respecto a la intensidad de línea de fuego fue mayor en las quemas de acículas.

Cuadro 12. Resumen de estadísticos de los modelos de la tasa de propagación (ROS) e intensidad de línea de fuego (IR) en las dominancias arbóreas evaluados por las quemas de acículas y por los escenarios de humedad del Fuel Fire Tools (FFT). FL es la longitud de la flama.

CC	n	$\log ROS = a * FL^b * \exp(-c * FL)$				$IR = a * FL^b$		
		a	b	c	r^2	a	b	r^2
Quema de acículas								
Oyamel	3	-	-	-	-	-	-	-
Pino-oyamel	18	15.1937	1.5948	3.3122	0.38	625.57	1.3714	0.53
Pino-encino	18	2.3979	0.839	1.3122	0.38	1107.5	1.6432	0.41
FFT: Humedad muy baja								
Oyamel	28	2.0053	1.4646	0.4162	0.71	356.08	0.3119	0.05
Pino-oyamel	28	2.7367	1.9062	0.7402	0.79	370.73	0.2452	0.02
Pino-encino	28	1.9557	1.3524	0.3927	0.82	357.48	0.5667	0.34
FFT: Humedad baja								
Oyamel	28	2.2778	1.5235	0.5211	0.68	340.99	0.3171	0.04
Pino-oyamel	28	3.0278	1.9680	0.8101	0.80	354.31	0.2372	0.02
Pino-encino	28	1.9701	1.3238	0.3836	0.83	346.30	0.5636	0.37
FFT: Humedad moderada								
Oyamel	28	3.3537	1.7733	0.8878	0.66	320.33	0.3113	0.03
Pino-oyamel	28	3.2061	1.9559	0.8314	0.82	334.10	0.2290	0.03
Pino-encino	28	2.0179	1.3102	0.3854	0.84	330.45	0.5711	0.40
FFT: Humedad alta								
Oyamel	28	25.8779	2.9631	2.9968	0.68	250.14	0.2467	-0.01
Pino-oyamel	28	3.9469	1.9906	0.9420	0.85	278.79	0.2486	0.07
Pino-encino	28	2.1225	1.2110	0.3651	0.83	282.70	0.6487	0.50

Las predicciones indican buena tendencia en el ajuste de la tasa de propagación y longitud de flama para la quema de acícula (Figura 14). Para los datos obtenidos de FFT, los ajustes de la tasa de propagación presentaron tendencias de acuerdo al escenario de humedad (Figura 15, Figura 16). Sin embargo, en

oyamel se observó una caída de la recta de propagación con el aumento de la longitud de flama en humedades altas, esto podría indicar que el fuego se apaga en áreas con baja continuidad de combustibles limitando el comportamiento extremo del fuego. Además, la humedad influyó significativamente en la intensidad de línea de fuego, con menor longitud de flama e intensidad de línea de fuego en escenarios más húmedas para las tres dominancias arbóreas.

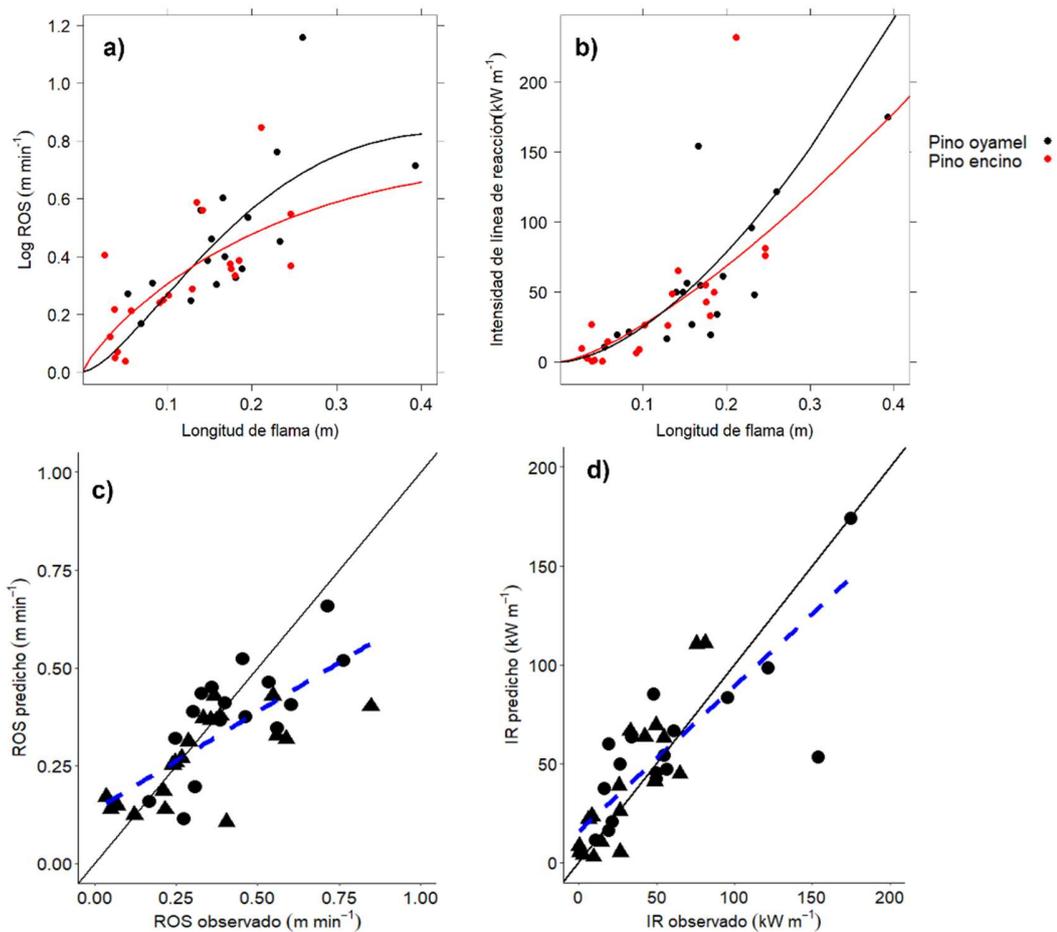


Figura 14. Ajuste de datos y valores predichos vs valores observados de las quemas de acículas: a) Tasa de propagación logarítmica (logROS), b) intensidad de línea de fuego en función de la longitud de flama, c) valores predichos vs valores observados de la tasa de propagación logarítmica y d) valores predichos vs valores observados de la intensidad de línea de fuego. La línea roja y negra de gráficos superiores corresponden a pino-encino y pino-oyamel, respectivamente. La línea azul de las gráficas inferiores es la correlación entre ambos datos y la línea continua corresponde a la concordancia perfecta.

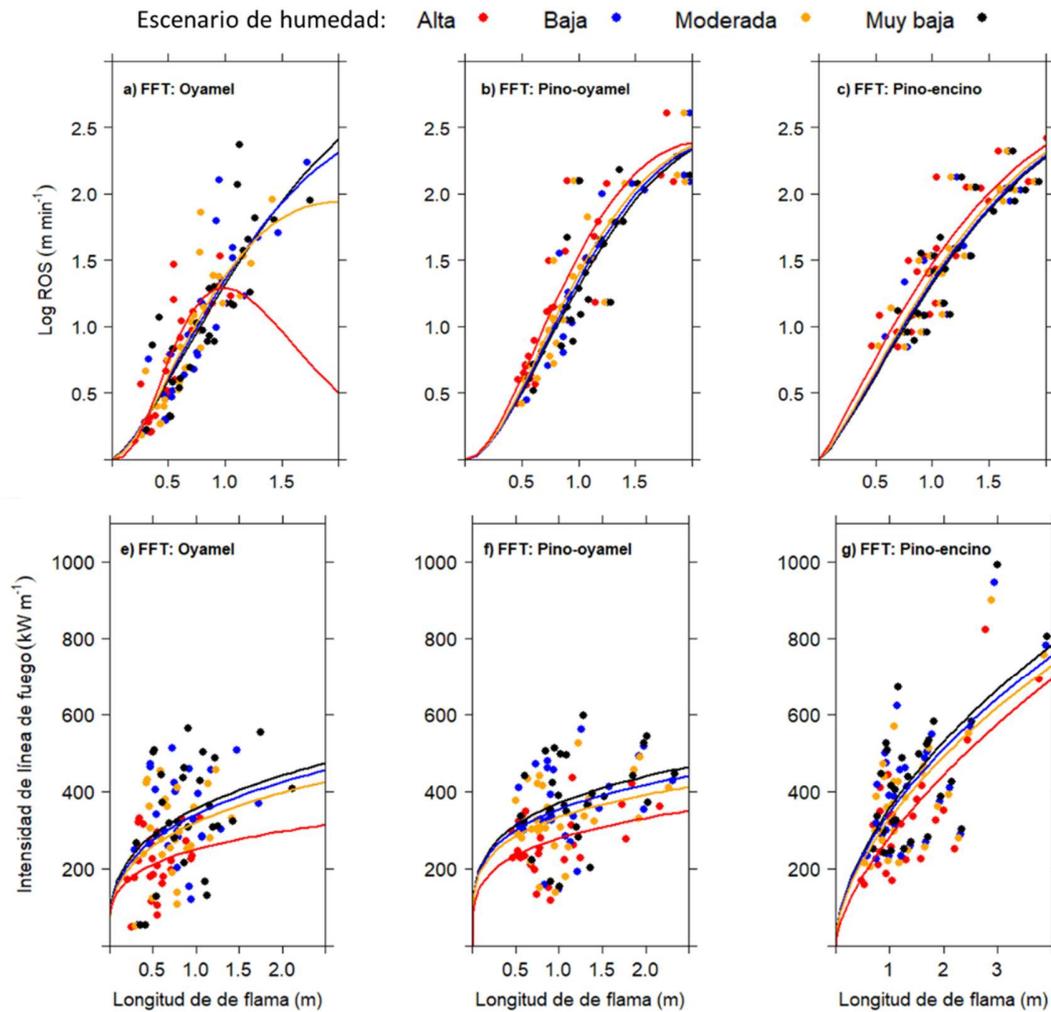


Figura 15. Tasa de propagación logarítmica e intensidad de línea de fuego en función de la longitud de flama de los escenarios de humedad de Fuel Fire Tools (FFT). La línea negra representa escenario muy baja en humedad, la línea azul escenario baja, la línea naranja escenario moderado y la línea roja escenario de alta humedad.

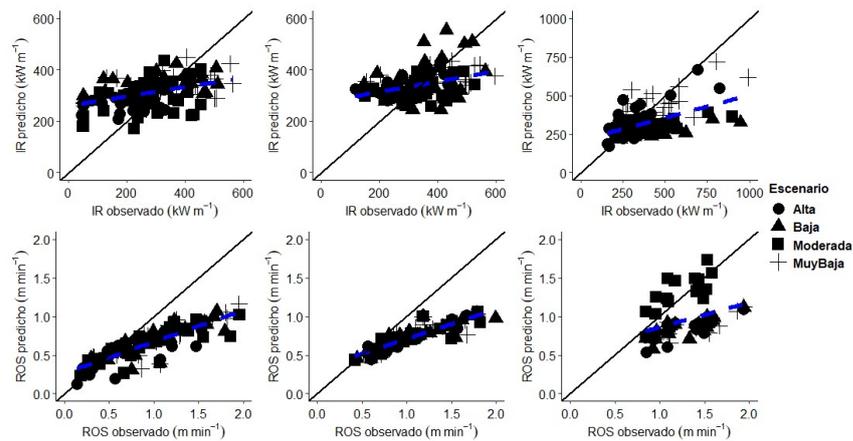


Figura 16. Tasa de propagación logarítmica (ROS) y longitud de flama (FL) observada vs predicha para los datos obtenidas de Fuel Fire Tools. La línea azul es la correlación entre ambos datos, la línea continua corresponde a la concordancia perfecta.

El comportamiento del fuego obtenido de FFT muestra relación positiva con el tamaño de las variables dasométricas del dosel; la altura, cobertura y carga de los arbustos; el porcentaje de pendiente; la tasa de propagación y la longitud de la flama (Figura 17). El índice de línea de fuego respondió en relación a la carga de cada componente del estrato, principalmente la relación fue directa en la intensidad liberada por los arbustos respecto a la longitud de flama. Por lo tanto, además de la pendiente, la presencia de arbustos en el sotobosque influye en el comportamiento del fuego.

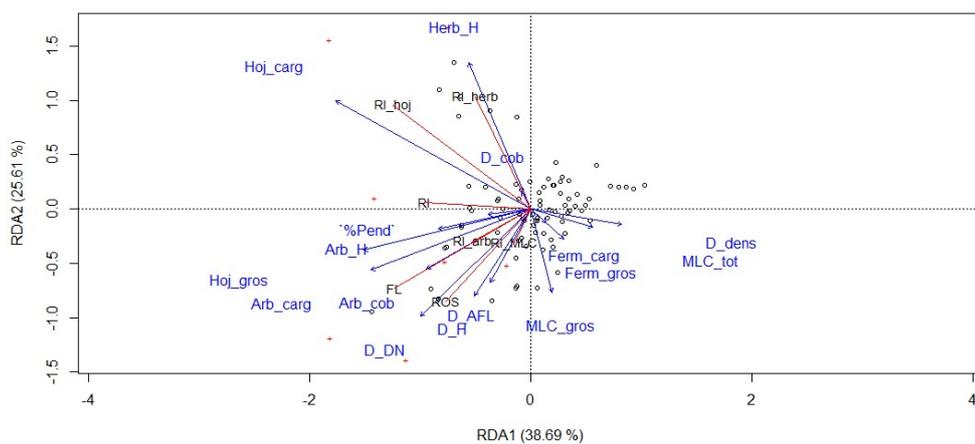


Figura 17. Relación biplot de ordenación de análisis de redundancia (RDA). Flechas rojas: variables de respuesta (longitud de flama (LF), tasa de propagación (ROS), intensidad de línea de fuego (RI) por estrato (herb= herbácea, arb= arbusto, hoj= hojarasca, MLC= material leñoso

caído); flechas azules: predictores (altura total de dosel (H), altura de fuste limpio de dosel (AFL), densidad de arbolado (dens), cobertura (cob), carga (carg), grosor (gros), material leñoso total (MLC_tot) y porcentaje de pendiente por estrato.

2.6. DISCUSIÓN

Las quemas experimentales mostraron aumento rápido del comportamiento del fuego en los primeros minutos, aumentando la intensidad de línea de fuego inicial, tal como se ha obtenido en trabajos como Kreye et al. (2011) y Tihay et al. (2014). Así mismo, el aumento de la pendiente en nuestras pruebas influyó en el aumento de las longitudes geométricas del fuego. Estudios anteriores como Rodrigues et al. (2019) y Sánchez-Monroy et al. (2019) han encontrado que a partir de los 30° la velocidad de propagación aumenta significativamente. Esto también pasa en el calor liberado según Tihay et al. (2014). Por otro lado, en los últimos segundos se observó la reducción del comportamiento del fuego, lo cual coincide con los observados en quemas de acículas de pinos realizadas por Morandini et al. (2018) y Tihay et al. (2014). Esto debido a la falta de continuidad de combustibles evitando que la frente de la flama influya en el calentamiento convectivo de los combustibles pre-quemados. Por lo que, en áreas con poca carga o reducción significativo de combustibles, la intensidad del fuego se reduce abriendo una ventana para su control y extinción. Sin embargo, esta puede cambiar en presencia del viento y pendiente influyendo en la inclinación de las flamas (Rossa & Fernandes, 2018).

En las camas con acículas de pino la velocidad de propagación del fuego fue mayor, sin lograr penetrar profundamente, por lo que se consumen únicamente los combustibles finos de la capa superficial, los cuales son más porosos y sensibles a la convección (Boboulos & Purvis, 2009; Morandini et al., 2018). Sin embargo, en combustibles no homogéneos como pino-encino se pueden formar parches sin quemar, lo cual se presentó en nuestras quemas de pino-encino. Estos parches no quemados durante un incendio forestal pueden favorecer a la flora y fauna sirviendo como área de refugio (Meddens et al., 2018).

La intensidad de línea de fuego en nuestro trabajo es baja a moderado de acuerdo a la clasificación de Alexander y Cruz (2019), con intensidades menores

de 1730 kW m^{-1} y longitud de flama menor de 2.4 m. La composición de los combustibles en la RBMM puede influir en la variación de intensidad de incendios superficiales; por ejemplo, los estratos del sotobosque favorecen la continuidad vertical de combustibles aumentando la probabilidad de ignición del dosel (Alexander & Cruz, 2012), y aumentando la intensidad de un incendio forestal. En intensidad menor a 346 kW m^{-1} y longitud de flama de 1.2 m liberada por las acículas, es posible el ataque directo al frente del fuego según Alexander y Cruz (2019). Para la RBMM, las condiciones accidentadas del terreno, la variación del viento y de las coberturas del sotobosque influirían en el comportamiento del fuego y el peligro en el ataque directo del fuego.

La correlación positiva de la pendiente con la geometría de la flama indica que con el aumento de la pendiente el comportamiento del fuego aumenta, esto influye en la mayor altura y longitud de flamas aumentando el efecto a la vegetación en áreas pronunciadas. Esto debido a que el tamaño de la flama en el frente del fuego permite mayor liberación de intensidad aumentando la pérdida de masa vegetal por su combustión (Morandini et al., 2013; Morandini et al., 2018). Así mismo, la elevada carga de hojarasca en áreas pronunciadas aumenta la altura y longitud de la flama. Aun cuando la carga no influye en el ángulo de inclinación de la flama respecto al combustible pre-quemado, el calor por radiación y convección tiene la capacidad de influir en la propagación.

En áreas con árboles bajas en altura o alta densidad de regeneración, además de un sotobosque denso pueden influir en la mayor longitud de flama con capacidad de afectar significativamente el dosel. Esto porque se ha identificado que el comportamiento del fuego tiene relación directa con la altura de los estratos y esta con la carga de combustible (Anderson et al., 2015; Davies et al., 2019). Por lo que, a mayor carga, mayor es el calor liberado (Tihay et al., 2014). Por lo tanto, la presencia de estratos sobrepuestos en el sotobosque aumenta el riesgo de la longitud de flamas e intensidad del fuego, con capacidad para dañar el dosel y causar mayor mortalidad de árboles (Silvani et al., 2018). Esto indica la importancia de identificar la flamabilidad de los arbustos y como su distribución puede influir en el comportamiento del fuego. Por otra parte, en pendientes

menores a 20°, el avance lento del fuego puede afectar al suelo por la intensidad de calor recibido en un mismo lugar por un tiempo más prolongado (Kreye et al., 2017; Santín & Doerr, 2016).

Los modelos ajustados confirman que las variables independientes utilizadas son descriptores adecuados para la propagación del fuego, altura, longitud y ángulo de flama. Por lo que, considerar la geometría de la flama permite mejorar los modelos de comportamiento de los incendios forestales (Cobian-Iñiguez et al., 2019). Sin embargo, de acuerdo al número de muestras quemadas para oyamel en nuestro trabajo, indican una opción para trabajos en el futuro. Generar modelos para oyamel es importante, debido a que es la dominancia arbórea con mayor carga en la RBMM, y los modelos permitirían conocer el comportamiento del fuego e identificar la posibilidad de la ignición de los combustibles.

Los modelos de comportamiento del fuego presentaron mayor r^2 al considerar la carga de combustible, la pendiente, la geometría de la flama y un variable del tiempo atmosférico (considerar que las quemas se realizaron en áreas cerradas con poca influencia de estas). Esto se reflejó en la buena tendencia de la dispersión de los valores observados y predichos, ya que, según Rosa y Fernandes (2018) la inestabilidad del fuego se nota en la mayor dispersión al aumentar los valores predichos y observados.

De acuerdo al tipo de vegetación y la estructura del combustible en el sotobosque varía el comportamiento del fuego (Rossa & Fernandes, 2018), tal como obtuve en este trabajo, donde el comportamiento del fuego aumentó al considerar todos los estratos del sotobosque. De igual manera influye la humedad de combustible (Espinosa et al., 2020; Kreye et al., 2020) y la topografía del terreno como la existencia de cañones (Pimont et al., 2012).

La variación de comportamiento del fuego aumenta la importancia de desarrollar modelos de predicción del comportamiento considerando las características topográficas, tiempo atmosférico y el estrato del sotobosque. Esto debido al cambio de la intensidad de línea de fuego y la tasa de propagación en cada dominancia arbórea, combustibles considerados y la humedad de combustibles, como se notó en este trabajo. Por lo que es importante generar modelos de

acuerdo las características estructurales del sotobosque para predecir el comportamiento superficial del fuego. Por otra parte, el modelo de predicción de la longitud de flama para este trabajo dio r^2 similar a la tasa de propagación de trabajos anteriores como Alexander y Cruz (2017), sin embargo, trabajos como Davies et al. (2019) han tomado como predictores la altura de la flama, humedad del combustible y la velocidad del viento, obteniendo buenos ajustes.

2.7. CONCLUSIONES

Las dominancias arbóreas desarrollan diferentes comportamientos del fuego con influencia significativa de la pendiente en la geometría del fuego. En pendientes con 20° aumenta la inclinación y longitud de la flama donde la carga de acículas influye en la altura y longitud de la flama e intensidad de línea de fuego. La altura del estrato del sotobosque influye en el aumento del comportamiento del fuego aumentando el riesgo del avance vertical de fuego. Las quemas con muestras de combustibles permiten buenos modelos de predicción de comportamiento del fuego permitiendo simular la propagación de incendios en campo. Los modelos del comportamiento mejoran al considerar la pendiente, la carga pre-quemada y un variable ambiental. Finalmente, este trabajo demuestra que las predicciones pueden mejorar y ser más precisas si se consideran los combustibles del sotobosque.

CAPITULO III. CONSUMO DE COMBUSTIBLES Y EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

3.1. RESUMEN

Los incendios forestales consumen grandes cantidades de combustible forestal, además de emitir gases de efecto invernadero a la atmosfera. El objetivo de este trabajo fue evaluar el consumo de combustibles y la emisión de gases en quemas de la capa de hojarasca para tres dominancias arbóreas. Se quemaron camas de capa de hojarasca de oyamel, pino-oyamel y pino-encino en tres condiciones de pendiente. Se evaluó la carga pre y post quema para conocer el consumo y calcular la emisión de gases, también se predijeron utilizando el programa CONSUME en 84 sitios muestreados. No obtuvimos variación de consumo y emisión en las quemas de la capa de hojarasca entre pino-encino y pino-oyamel, tampoco entre pendientes. El consumo para las quemas fue de 60, 45, y 25% en pino-oyamel, pino-encino y oyamel, respectivamente, y la emisión fue de 647, 437, 46 gr kg⁻¹, respectivamente. CONSUME predijo mayor consumo en oyamel, seguidos de pino-encino y pino-oyamel con 56.75, 43.18, y 42.94 Ton ha⁻¹, respectivamente. El consumo correspondió el 72% del dosel, seguida por el MLC (17%), arbustos (9%), y herbáceas (2%), capa de hojarasca, y capa de fermentación. Obtuvimos modelos de predicción que explicaron el 94% de la variación en el consumo y 74% en las emisiones. Las dominancias arbóreas donde está integrado pino no tienen variación de consumo de combustible y emisión de gases. La mayor carga de combustibles leñoso presente en áreas con oyamel influye en el mayor consumo de combustibles y emisión de gases en un incendio.

Palabras clave: CO₂, comportamiento del fuego, ecuaciones de estimación, fases de combustión, quema de acículas.

3.2. ABSTRACT

The forest fires consume high amounts of forest fuels, in addition to emitting greenhouse gases into the atmosphere. The objective of this work was to evaluate the consumption of fuels and the emission of gases in burnings of the litter of arboreal dominance. For this, the litter was burning of fir, fir-pine, and oak-pine in three slope conditions. The pre and post burn load was evaluated to know the consumption and calculate the gas emission, also, were predicted using the CONSUME program in 84 sites sampled. The results did not show the variation of consumption and emission in the burnings of the litter between oak-pine and fir-pine, nor between slopes. The consumption percentage was 60, 45, and 25% in fir-pine, pine-oak, and fir, respectively, and the emission was 647, 437, 46 gr kg⁻¹, respectively. CONSUME predicted higher consumption in oyamel, followed by oak-pine and fir with 56.75, 43.18, and 42.94 Ton ha⁻¹, respectively. The consumption corresponded to 72% of the canopy followed by MLC (17%), shrubs (9%), and 2% to herbaceous, litter, and fermentation. The prediction models were obtained that explained 94% of the variation in consumption and 74% in emissions. The arboreal dominance in which pine is integrated don't have variation in fuel consumption and gas emissions. The higher fuel load total present in area with fir influences the higher fuel consumption and emission of gases in a fire.

Keywords: CO₂, fire behavior, estimation equations, combustion phases, needles burning.

3.3. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales influyen en la ecología, con diferentes efectos sobre los seres vivos; desde la evolución, adaptación y salud por las emisiones (Cascio, 2018). Uno de los efectos más visibles es el consumo de combustibles, la cual es la masa vegetal que se quema durante un incendio forestal por una reacción térmica/química oxidando al combustible produciendo CO₂, agua y calor (Ottmar, 2014). Para la combustión influyen las propiedades químicas y físicas de los

combustibles (Ottmar, 2014; Werth et al., 2016), el contenido de humedad, la compactación y la ventilación de los combustibles (Alexander & Cruz, 2017). Por ejemplo, los combustibles finos requieren menos calor para su ignición que los combustibles pesados (Ottmar, 2014) y dependen en gran medida de los cambios de la temperatura del aire y la humedad relativa (Prichard et al., 2017).

En el proceso de combustión influyen las características y estructura de los combustibles, el viento, el paisaje y la geometría del fuego, tipo de incendio, el tiempo atmosférico, la topografía (O'Brien et al., 2018). El consumo de combustible en combinación con el área quemada, las características del combustible y el comportamiento del fuego libera GEI como CO₂, CO, CH₄, N₂O, NO_x, PM 2.5, PM 10, entre otros (Ottmar, 2014); estas emisiones contribuyen al cambio climático (Fernández-Alonso et al., 2017). En un incendio forestal, rara vez la eficiencia de combustión es del 100%, pero se emiten cientos de compuestos a la atmosfera además de vapor de agua que varía de acuerdo a la fase de combustión (Ottmar, 2014).

La combustión inicia con una fase de preignición donde los combustibles del frente del fuego reciben temperaturas de 325 a 355 °C por radiación y convección liberando la humedad, GEI y vapores orgánicos. La segunda fase es de combustión en flama desarrollándose entre 500 a 1900 °C consumiendo mayor combustible, liberando mayor energía, CO, CO₂, CH₄, carbono negro y vapor de agua. La tercera fase es una combustión lenta entre 300 a 600 °C reduciendo la intensidad de energía liberada, pero con mayor impacto por la reducción de la velocidad del fuego afectando la capa orgánica del suelo y los combustibles pesados; así como la reducción de emisión de GEI, pero con mayor emisión de PM (Kreye et al., 2014; Ottmar, 2014). Finalmente, la fase de combustión latente o brillante, con consumo lento de residuos, capa orgánica y combustibles podridos bajo temperaturas similares a la fase lenta liberando principalmente CO, CO₂, CH₄ hasta tener ceniza gris mineral (Keeley, 2009; Ottmar, 2014).

Los GEI aumentan de acuerdo al tamaño del incendio aumentando el peligro para la salud humana, con mayor efecto en la calidad del aire que se respira para la población local o regional con interfaz urbano-forestal, esto aumenta la presencia

de enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Cascio, 2018; Drury et al., 2014; Liu et al., 2015; Rappold et al., 2017; Reid et al., 2016).

La composición de especies en una comunidad vegetal influye en la productividad, acumulación, propiedades físicas y químicas de los combustibles; esto a su vez influye en la flamabilidad, comportamiento del fuego y consumo de acuerdo al estrato (Cornelissen et al., 2017; Grootemaat et al., 2017). Los efectos del fuego, como la mortalidad de los árboles pueden aumentar después de varios años del incendio (Bär et al., 2018). Esto resalta la importancia de generar modelos de predicción de consumo y emisión de GEI para mejorar la gestión de incendios y planificación de quemas prescritas (Fernandes & Loureiro, 2013; Prichard et al., 2017). Sin embargo, generar modelos es complejo por la combinación de múltiples factores como el tamaño del incendio, la carga de combustible antes del incendio, el consumo, entre otros (Drury et al., 2014).

Conocer el consumo de combustibles por un incendio forestal permite conocer los efectos por el fuego, estimar la pérdida de carbono (Fernandes & Loureiro, 2013; Reid et al., 2012) y la emisión de GEI para evaluar el impacto a la calidad del aire y salud humana (Cascio, 2018; Drury et al., 2014). Esta información permite identificar las áreas que podría generar mayor emisión y buscar estrategias de reducción del impacto del humo. Esto debido a que los bosques con alta acumulación de combustible forestal son seguidos por actividades de perturbación como ataque de plagas, daños por ventarrones o nuevamente incendios forestales (Brewer et al., 2013). Para el caso de incendios forestales los combustibles finos son los determinantes del comportamiento del fuego y los primeros en consumirse (Fernandes & Loureiro, 2013).

Para ecosistemas mexicanos son pocos los estudios respecto al consumo de combustibles y emisión de GEI medidos directamente en incendios forestales, tales como Cofer et al. (1993), Díaz-Hernández et al. (2021), Flores-Garnica y Benavides-Solorio (1995), Rodríguez-Trejo (2018), Yokelson et al. (2007, 2009, 2011). Por lo que nuestro trabajo es la primera que trata de consumo y emisiones de GEI a partir colectas de la capa de hojarasca de áreas con dominancias arbóreas de oyamel, pino-oyamel y pino-encino distribuidas en la RBMM.

3.4. MATERIAL Y MÉTODOS

3.4.1. Cálculo de consumo y emisiones por quemas de acículas

Los datos se generaron de las 54 quemas de las camas de hojarasca realizadas. Después de la quema, cuando la plataforma se enfrió recogí y pesé el combustible no quemado y la ceniza residual. Calculé el consumo mediante la diferencia del peso seco de combustibles pre y posquemas incluyendo residuos y la ceniza. Para obtener la emisión de las quemas use las fórmulas propuestas de Russell-Smith et al. (2009) que establece procedimientos de acuerdo a la clase de combustible. Esta ecuación es más puntual al considerar el contenido de carbono y nitrógeno en los combustibles, además de corregir el área quemado eliminando las áreas sin quemar (islas de combustibles no quemados). Para obtener las emisiones se emplearon las siguientes ecuaciones:

Para calcular el CH₄, CO, CO₂

$$E_C = EF * AP * FL * BEF * CC * M$$

Para calcular el NO₂ y NO_x

$$E_N = EF * AP * FL * BEF * CC * NC * M$$

Donde:

E_C= Emisión para CH₄, CO, CO₂

E_N= Emisión para NO₂ y NO_x

EF= Factor de emisión obtenido de Akagi et al. (2011). 1637 para CO₂, 89 para CO, 3.92 para CH₄, 2.51 para NO_x, 0.16 para NO₂

AP= Área quemada corregida por las islas no quemadas

FL= Carga de combustibles prequemada

CC= Contenido de carbono del combustible, se usó el estándar de 46%

NC= Relación nitrógeno/carbono de combustible (0.011)

M= Relación de la masa molecular a la masa elemental por cada especie

BEF= Factor de eficiencia de combustión

$$BEF = 1 - \frac{Mash}{Mfuel}$$

Donde:

Mash= Carga residual de combustibles no quemado más carga de ceniza

Mfuel= Carga de combustibles prequemada

3.4.2. Uso de Fuel Fire Tools

Para calcular las emisiones de los sitios muestreados en campo usé FFT con las predicciones del potencial del fuego obtenidas de FCCS y el complemento CONSUME versión 5.0. Obtuve la emisión de CO, CO₂, CH₄, NO, NO_x, PM_{2.5}, PM₁₀, dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂), amoníaco (NH₃), hidrocarburos distintos del metano (NMOC). Usé la humedad de combustible predeterminada por CONSUME y el porcentaje de consumo por estrato según Fire Emission Production Simulator (FEPS) (Cuadro 13).

Cuadro 13. Escenario de contenido de humedad de los combustibles y consumo, para la predicción del consumo de combustibles usando CONSUME.

Condiciones de humedad	Humedad en combustibles (%)			Consumo (%) ³		
	1000 h ¹	Duff ²	Litter ²	Arbustos	Dosel	Apilamientos
Muy baja (D2L1)	8	26	15	89	86	99
Baja (D2L2)	12	38	25	86	80	95
Moderada (D2L3)	15	42	31	80	63	90
Alta (D2L4)	31	97	86	63	40	80

¹obtenidos de (Drury et al., 2014), ²obtenidos de muestras de campo, ³obtenidos de Fire Emission Production Simulator (FEPS).

3.4.3. Análisis estadístico

Para el análisis de datos de las quemas, también omití la dominancia arbórea de oyamel, por lo que el análisis se realizó entre pino-encino y pino-oyamel. Transformé los datos a logarítmicos cuando no cumplieron los supuestos de normalidad. Comparé entre dominancia arbórea y pendiente el consumo y la emisión de GEI obtenidos de las quemas y los obtenidos de CONSUME mediante un ANOVA, con prueba post hoc de Tukey. Se consideraron significativos si $p < 0.05$. Realicé la correlación de Pearson para conocer la relación entre carga

de combustible pre-quemada, comportamiento del fuego, consumo y emisión. Usé regresiones lineales para probar la relación y generar modelos para estimar el consumo en función de la carga de la prequema y comportamiento del fuego durante la quema. Para el caso de CONSUME consideré las tres dominancias arbóreas y obtuve el consumo por estrato y por fase de combustión. Todos los análisis estadísticos los realicé usando Rstudio (Rstudio Team, 2020).

3.5. RESULTADOS

3.5.1. Consumo de combustibles por quemas de acículas

Previo a la quema, no hubo variación significativa en la carga de combustible entre pino-encino y pino-oyamel. Las quemas redujeron la carga de combustibles respecto a la carga inicial, $F_{1,31}=115.32$, $p<0.001$. Después de las quemas, la carga de combustible no consumida, el consumo de combustible y los residuos no fueron significativos entre las dominancias de pino-encino y pino-oyamel, pero la cantidad de residuo fue más constante en pino-oyamel. La ausencia de variación del consumo fue porque BEF no varió entre dominancia arbórea, $F_{1,31}=3.961$, $p=0.055$; En pino-oyamel el valor fue de 0.35 a 0.79 y de 0.04 a 0.81 en pino-encino (Cuadro 14). El mayor rango de BEF en pino-encino es porque hubo muestras que se quemaron menos del 20%, debido al mayor porcentaje de hojas de encino influyendo en el tiempo de ignición de los combustibles del frente del fuego. Además, se observó que las hojas de encino fueron carbonizadas en el borde sin consumirse completamente.

Cuadro 14. Promedio y significancia de ANOVA de la carga de combustibles antes (*wPre*) y después (*wPos*) de las quemas, consumo, factor de eficiencia (*BEF*) y residual carbonizado (*ResiduoC*) entre las dominancias arbóreas o camas de combustibles forestales (CC) y pendientes en grados (ϕ). En pendientes se presentan los grupos de variación con letras a, b y c. Para el ANOVA no se consideró la cama de combustibles de oyamel. O= oyamel, PO= pino-oyamel, PE= pino-encino.

Factor	<i>wPre</i> (kg m ²)		<i>wPos</i> (kg m ²)		Consumo (kg m ²)		<i>BEF</i>		<i>ResiduoC</i> (kg m ²)	
	M (sd)	p	M (sd)	p	M (sd)	p	M (sd)	p	M (sd)	p
CC		0.562		0.113		0.309		0.055		0.774
O	0.19 (0.16)		0.11 (0.08)		0.09 (0.11)		0.25 (0.30)		0.001 (0.002)	
PO	0.50 (0.25)		0.21 (0.16)		0.27 (0.13)		0.60 (0.14)		0.017 (0.009)	

PE	0.57 (0.43)		0.33 (0.22)		0.22 (0.15)		0.45 (0.25)		0.016 (0.017)
ϕ		0.005		0.007		0.109		0.098	0.870
0	0.61 (0.21)	a	0.38 (0.24)	a	0.22 (0.15)		0.40 (0.26)		0.017 (0.020)
10	0.37 (0.15)	b	0.14 (0.08)	b	0.20 (0.08)		0.57 (0.14)		0.018 (0.007)
20	0.63 (0.27)	a	0.30 (0.18)	ab	0.32 (0.17)		0.50 (0.18)		0.015 (0.012)
CC* ϕ		0.124		0.044		0.803		0.281	0.832

De acuerdo a la pendiente, la carga de combustibles fue diferente antes y después de la quema, mientras que el consumo, el BEF y el residuo no variaron entre pendientes (Cuadro 14). En las tres pendientes el promedio de BEF fue similar con rango entre 0.04 a 0.76, 0.31 a 0.81, 0.25 a 0.79 en 0, 10 y 20°, respectivamente. En efecto, el consumo de combustible correlacionó positivamente con el residuo ($r=0.67$, $p<0.001$), lo cual correspondió en las dominancias arbóreas. De acuerdo a las pendientes, la relación fue negativa ($r=-0.06$, $p=0.65$), encontrando que en pendiente de 20° donde el consumo fue ligeramente mayor el residuo fue menor.

Al no encontrar variación de consumo entre pino-encino y pino-oyamel se generaron ecuaciones lineales mixtos ($n=37$) aplicables para ambas dominancias arbóreas. Las variables predictoras fueron significativas en las ecuaciones, sin colinealidad ($VIF= 2.94$). La ecuación 1 del Cuadro 15 permite estimar el consumo a partir de la carga de combustible prequemada y BEF ($r^2=0.91$), pero mejoró con la agregación de la intensidad de línea de fuego y la tasa de propagación (Ecuación 2, $r^2=0.93$). Se generó una ecuación para BEF (Ecuación 3, $r^2=0.88$) donde las variables significativas fueron la carga de combustible prequemada y el consumo.

Cuadro 15. Ecuaciones de estimación de consumo y gases emitidos por las quemas de camas de hojarasca realizadas ($n=37$). wPre= Carga de combustible quemada (kg m^2), BEF= Factor de eficiencia de combustión, IR= Intensidad de línea de fuego (Kw m^{-1}), ROS= Tasa de propagación (m min^{-1}), ResiduoC= Residuo carbonizado (kg m^2), HF= Altura de la flama (m), PorCons= Proporción de combustible quemado (kg m^2), SE= error estándar. Todas las ecuaciones fueron significativas con valor $p<0.05$.

No.	Ecuación	R	R ²
Consumo			
1	Consumo= $-0.277 + 0.464$ (wPre) + 0.564 (BEF)	0.91	0.91
2	Consumo= $-0.180 + 0.338$ (wPre) + 0.448 (BEF) + 0.001 (RI) - 0.051 (ROS)	0.94	0.93

3	BEF= 0.509 -0.755 (wPre) + 1.553 (Consumo)	0.89	0.88
4	ResiduoC = -0.003 + 0.049 (Consumo) -0.0002 (IR) + 0.123 (HF)	0.514	0.47
Emisión			
5	CH4= -0.462 + 0.009 (PorCons) + 0.726 (wPre) + 0.573 (HF)	0.74	0.71
6	CO= -18.328 + 0.367 (PorCons) + 28.780 (wPre) + 22.724 (HF)	0.74	0.72
7	CO2= -529.672 + 10.602 (PorCons) + 831.728 (wPre) + 656.735 (HF)	0.74	0.72
8	NO2= -0.00049 + 0.00001 (PorCons) + 0.0007 (wPre) + 0.000610 (HF)	0.74	0.72
9	NOx= -0.00522 + 0.00010 (PorCons) + 0.00820 (wPre) + 0.00647 (HF)	0.74	0.72

Otro variable explicativa del consumo no considerado en las ecuaciones es la humedad del combustible; la razón, es porque quemamos los combustibles en condición de peso seco. Para las variables del comportamiento del fuego, dos fueron significativas dentro del modelo de consumo, además correlacionaron (Cuadro 16). Las variables del comportamiento del fuego, la carga de combustible quemada y el grosor de la capa de hojarasca correlacionaron con el residuo carbonizado; por lo que la altura de la flama, la intensidad de línea de fuego y el consumo estimaron significativamente la producción de residuos carbonizados (Ecuación 4, $r^2=0.4$, cuadro 15). Las ecuaciones indican buena tendencia en el ajuste de los datos observados y predichos, sin embargo, el residual carbonizado muestra una distribución más dispersa entre los puntos (Figura 18).

Cuadro 16. Correlación entre el consumo, porcentaje de consumo y residuo carbonizado con la carga de combustible quemada, densidad aparente, grosor de la cama de acículas quemada y el comportamiento del fuego. * Significancia de $p<0.05$.

Parámetros	Consumo	Porcentaje de consumo	Residuo carbonizado
Consumo	-	-	0.67*
Carga prequema	0.77*	0.25	0.59*
Densidad aparente	0.38*	0.25	-0.02
Grosor de cama de acículas	0.52*	0.21	0.70*
Velocidad de propagación	0.69*	0.49*	0.66*
Longitud de la flama	0.72*	0.51*	0.82*
Altura de la flama	0.77*	0.50*	0.83*
Intensidad de línea de fuego	0.84*	0.56*	0.74*
Angulo de separación del fuego	0.26	0.44*	0.54*

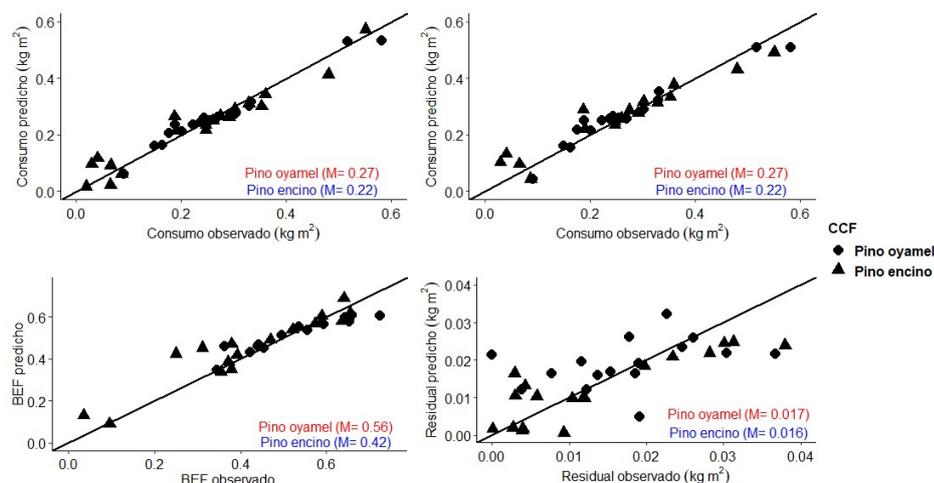


Figura 18. Gráficos de consumo, factor de eficiencia de combustión (BEF) y residuo carbonizado observados y predichos. La información de los modelos se encuentra en el cuadro 15. El gráfico superior izquierdo corresponde a la ecuación 1 de consumo y el gráfico superior derecho a la ecuación 2 de consumo.

3.5.2. Emisión por quemas de acículas

Con la ecuación de Russell-Smith et al. (2009) obtuve que las quemas realizadas emitieron principalmente CO_2 (97%) y solo el 3% correspondió a CO , CH_4 , NO_2 y NO_x . Las emisiones totales de las quemas fueron de 647, 437 y 46 gr kg^{-1} en pino-oyamel, pino-encino y oyamel, respectivamente (Cuadro 17). Al realizar la corrección del área quemada eliminando las islas de hojarasca no quemadas la emisión cambió, por lo que es importante corregir el área quemada para aumentar la precisión de las emisiones. Las emisiones permitieron generar ecuaciones de estimación donde las variables predictoras fueron significativas ($p < 0.05$) sin multicolinealidad ($\text{VIF} = 1.71$). Los predictores fueron el porcentaje de consumo, la carga de combustible quemada y la altura de flama (Cuadro 15), e indicaron buena tendencia en el ajuste observados y predichos (Figura 19).

Cuadro 17. Emisiones obtenidas de las quemas de acículas y por CONSUME en las tres dominancias arbóreas y en los cuatro escenarios de humedad.

Gases	Oyamel		Pino-oyamel		Pino-encino	
	Media (sd)	Rango	Media (sd)	Rango	Media (sd)	Rango
Quema de acículas (gr kg^{-1})						
CO_2	44.85 (109.57)	0-328.46	624.81 (341.52)	130.00-1445.09	421.76 (295.93)	2.69-944.24

CO	1.55 (3.79)	0-11.37	21.62 (11.82)	4.50-50.00	14.59 (10.24)	0.09-32.67
CH ₄	0.04 (0.10)	0-0.29	0.55 (0.30)	0.11-1.26	0.37 (0.26)	0.01-0.82
NO _x	0.0004 (0.0011)	0- 0.0032	0.0062 (0.0034)	0.0013 - 0.0143	0.0042 (0.0030)	0.00003 - 0.009
NO ₂	0.0001 (0.0001)	0- 0.0003	0.0006 (0.0003)	0.00012 - 0.001	0.0004 (0.0003)	0 - 0.0008
CONSUME (kg ha ⁻¹)						
CO ₂	93626 (41259)	29921-231781	70802 (29801)	19299-155564	72082 (33185)	23205-190313
CO	5069 (2484)	1579-14852	3868 (1726)	1052-8938	2386 (1098)	768-6299
CH ₄	230.28 (119.71)	69.39-725.90	176.47 (81.78)	47.85-417.54	101.46 (46.71)	32.66-267.88
NO	104.86 (49.84)	33.27 (294.55)	79.82 (34.98)	21.73 (182.07)	71.24 (32.80)	22.93 (188.90)
NO _x	80.94 (34.70)	24.87-188.37	61.30 (25.38)	16.65-131.80	110.10 (50.69)	35.44-290.68
NO ₂	76.36 (32.82)	23.57-179.02	57.60 (23.98)	15.70-124.64	66.06 (30.41)	21.26-174.42
SO ₂	79.95 (36.80)	25.79-213.96	60.70 (26.13)	16.53-136.43	21.16 (9.74)	6.82-55.85
NH ₃	55.10 (28.20)	16.76-170.49	42.18 (19.35)	11.47-99.20	25.91 (11.93)	8.34-68.39
NMOC	1531 (679)	493-3838	1158 (489)	316-2554	1165 (536)	375-3075
PM ₁₀	915.11 (432.86)	291.07-2553.01	696.32 (304.33)	189.57-1584.96	327.62 (150.83)	105.47-865.01
PM _{2.5}	823.68 (389.61)	261.99-2297.94	626.75 (273.93)	170.63-1426.61	294.89 (135.76)	94.94-778.56

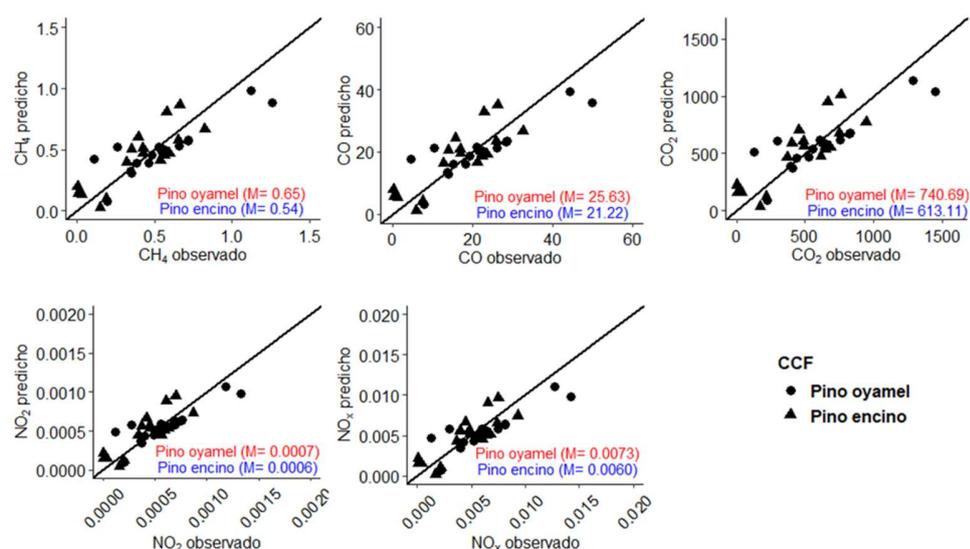


Figura 19. Gráficos de emisiones observados y predichos en función de la proporción de combustible consumido, carga de combustible quemado y la intensidad de línea de fuego.

3.5.3. Consumo de combustibles por Fuel Fire Tools

Empleando CONSUME y la carga de combustible de los 84 sitios muestreados obtuve mayor consumo en oyamel y similar entre pino-oyamel y pino-encino (Cuadro 18). El mayor consumo en oyamel se debe a que fue donde se encontró mayor carga de combustible. CONSUME predijo que el 72±2 % del consumo

correspondió al dosel, 17±2 % al MLC, 9±2 % a los arbustos y menos del 2 % a las herbáceas, la capa de hojarasca y de fermentación (Figura 20).

Cuadro 18. Medias de consumo (Ton ha⁻¹) por quema de acículas y predichas por CONSUME en las tres dominancias arbóreas.

	CC ($p < 0.001$, $F_{2,324} = 18.924$)			Escenario de humedad de combustibles ($p < 0.001$, $F_{3,324} = 27.427$)			
	Oyamel	Pino-oyamel	Pino-encino	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
Media	56.75	42.94	43.18	33.16	45.34	54.14	57.84
SD	25.17	18.13	19.88	14.45	18.85	22.30	23.60
Rango	18.3-142.3	11.7-94.7	13.9-114.0	11.7-104.5	14.4-123.5	16.4-136.8	17.6-142.3
Grupo	a	b	b	c	b	a	a

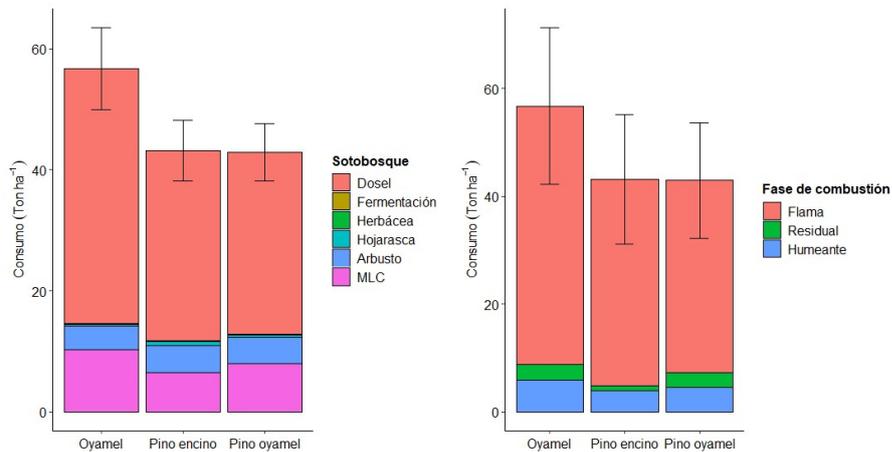


Figura 20. Consumo de combustibles por estrato y por fase de combustión para la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca predichos por CONSUME.

Con respecto a las fases de combustión, la fase de flama es la que mayor consume (>82%), seguida por la fase humeante (9 a 11 %) y menormente la fase residual (<7%). El consumo varío de acuerdo al escenario de humedad de los combustibles, siendo mayor en escenario de humedad baja y muy baja (Cuadro 18), mientras que en humedades altas el consumo fue menor, lo cual es lógico ya que en condiciones secas es más fácil la ignición y el consumo.

3.5.4. Emisión por quemas por Fuel Fire Tools

Las emisiones predichas por CONSUME correlacionaron fuerte ($r>0.85$) y significativamente con el consumo de combustible; la mayor correlación se obtuvo en la fase de flama ($r=0.69-0.97$) seguida por la fase humeante ($r=0.66-0.89$) y la fase residual ($r<0.49$). La emisión total fue mayor en oyamel, seguida por pino-oyamel y pino-encino con 102591.98, 77628.66 y 76652.11 kg ha⁻¹, respectivamente (Cuadro 17); de estas el 94% corresponden al CO₂ y el resto a CO, CH₄, NH₃, NO, NO₂, NO_x, SO₂, PM₁₀, PM_{2.5} y NMOC.

Los escenarios de humedad de combustibles influyeron en la emisión de gases, variando en un 43% entre el escenario de alta a muy baja humedad (Figura 21 y Cuadro 19). Esto es lógico ya que las emisiones dependen del consumo que está en función de los combustibles disponibles para su ignición, pero para que puedan quemarse en su totalidad o parcialmente dependen de la humedad de combustible. Al igual que en el consumo, la mayor emisión corresponde al dosel.

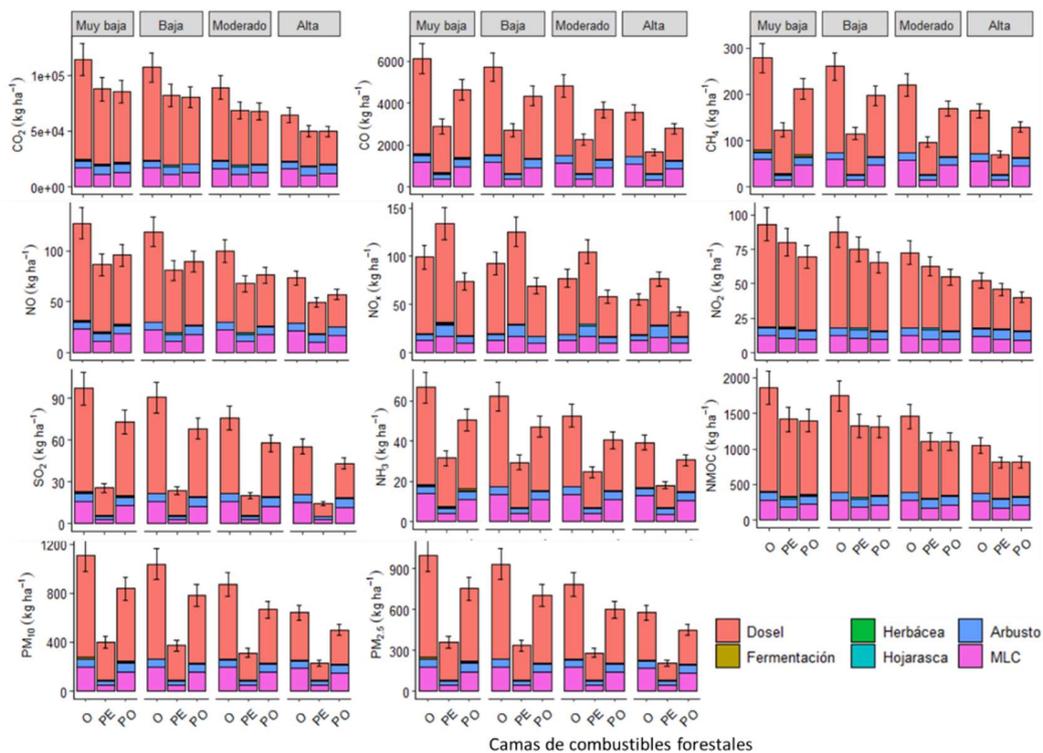


Figura 21. Emisiones en las tres dominancias arbóreas de acuerdo a los escenarios de humedad muy baja, baja, moderada y alta. En el eje x, O= oyamel, PE= pino-encino, PO= pino-oyamel.

Cuadro 19. Medias de las emisiones predichas por CONSUME en cuatro escenarios de humedad. En kg ha⁻¹.

	Alta (N=84)	Moderada (N=84)	Baja (N=84)	Muy Baja (N=84)
CH ₄ ($p < 0.001$, $F_{3, 324} = 26.280$)				
Media (SD)	121.16 (78.57)	161.68 (93.66)	190.63 (105.27)	204.14 (110.46)
Rango	32.66 - 576.07	43.43 - 651.23	51.39 - 702.71	55.21 - 725.90
CO ($p < 0.001$, $F_{3, 324} = 28.205$)				
Media (SD)	2674 (1586)	3599 (1939)	4262 (2213)	4561 (2329)
Rango	768 - 11530	1021 - 13197.51	1208 - 14350	1298 - 14852
CO ₂ ($p < 0.001$, $F_{3, 324} = 32.351$)				
Media (SD)	54826 (23602)	75053 (30945)	89675 (36707)	95793 (38871)
Rango	19299 - 169457	23757 - 200791	27052 - 222818	29036 - 231781
NH ₃ ($p < 0.001$, $F_{3, 324} = 26.771$)				
Media (SD)	29.29 (18.25)	39.18 (21.86)	46.26 (24.65)	49.52 (25.88)
Rango	8.34 - 134.58	11.09 - 152.59	13.13 - 164.97	14.10 - 170.49
NMOC ($p < 0.001$, $F_{3, 324} = 32.058$)				
Media (SD)	894 (390)	1223 (508)	1461 (601)	1560 (637)
Rango	316 - 2820	388 - 3332	442 - 3691	475 - 3838
NO ($p < 0.001$, $F_{3, 324} = 29.290$)				
Media (SD)	60.08 (29.87)	81.31 (37.03)	96.57 (42.69)	103.28 (44.93)
Rango	21.73 - 225.53	26.47 - 260.18	29.98 - 284.25	32.52 - 294.55
NO ₂ ($p < 0.001$, $F_{3, 324} = 33.559$)				
Media (SD)	46.15 (18.81)	63.45 (25.28)	75.97 (30.33)	81.12 (32.21)
Rango	15.70 - 127.97	19.41 - 153.65	22.16 - 171.79	23.68 - 179.02
NO _x ($p < 0.001$, $F_{3, 324} = 33.716$)				
Media (SD)	58.18 (27.14)	79.95 (37.11)	95.73 (44.70)	102.23 (47.66)
Rango	16.65 - 151.14	20.58 - 220.84	23.49 - 271.35	25.11 - 290.68
SO ₂ ($p < 0.001$, $F_{3, 324} = 30.497$)				
Media (SD)	37.85 (25.51)	51.39 (32.74)	61.14 (38.22)	65.36 (40.49)
Rango	6.82 - 161.09	9.06 - 187.65	10.72 - 206.18	11.51 - 213.96
PM ₁₀ ($p < 0.001$, $F_{3, 324} = 29.463$)				
Media (SD)	455.63 (286.98)	616.11 (360.26)	731.45 (416.41)	782.21 (439.88)
Rango	105.47 - 1950.26	140.23 - 2252.98	165.92 - 2463.30	178.27 - 2553.01
PM _{2.5} ($p < 0.001$, $F_{3, 324} = 29.463$)				
Media (SD)	410.11 (258.31)	554.56 (324.27)	658.37 (374.80)	704.06 (395.93)
Rango	94.94 - 1755.41	126.22 - 2027.88	149.34 - 2217.19	160.46 - 2297.94

3.6. DISCUSIONES

3.6.1. Consumo de combustible

La carga de la cama de hojarasca quemada y el comportamiento del fuego correlacionaron fuertemente con el consumo de combustibles y los residuos. La alta correlación entre la capa de hojarasca y el consumo se ha obtenido también en quemas prescritas de pino y encino (Ottmar et al., 2016). Además, el porcentaje de consumo obtenido es similar al obtenido en quemas de bosque de pino marítimo de Portugal (Fernandes & Loureiro, 2013) y bosque de pino del suroeste de Estados Unidos de América (Yokelson et al., 2013).

En hojarasca mixta de pino y encino el consumo de combustible no fue homogéneo. Esto indica que el consumo puede variar con la composición heterogénea del combustible, por ejemplo, Brewer et al. (2013) encontraron que el tamaño de partículas influyó en la carbonización y consumo de combustible. Incluso el consumo puede variar en áreas con el mismo género de árboles (Weir & Limb, 2013), y en comunidades heterogéneas influyendo en la mortalidad después de un incendio forestal (Hood et al., 2018). Por lo tanto, se pueden encontrar irregularidades en un incendio presentando islas con hojarascas no quemadas sirviendo como área de refugio para la fauna y la flora como menciona Meddens et al. (2018). Por ello, es importante identificar las áreas no quemadas dentro de un incendio forestal y evaluar los cambios posincendio y la reacción de las plantas al calor recibido durante el incendio.

Para las quemas no se consideró el MLC, sin embargo, estudios como Brewer et al. (2013) y Knapp et al. (2005) encontraron que el consumo del MLC varía de acuerdo al tamaño de los combustibles leñosos y presentando mayor residuo en áreas de mayor carga de MLC <7.6 cm. Esto debido a que los MLC grandes no se consumen por completo, sin embargo, al quemarse aumenta la longitud de flama, la energía liberada, los gases emitidos y la carbonización del dosel ocasionando lesiones visibles en la parte superior e incluso iniciar un incendio de copa por la radiación y convección (Varner et al., 2021).

En efecto, CONSUME predice un alto consumo del dosel para la RBMM, esto debido a que la estimación está en función de la carga de combustible de todos los estratos disponible a quemarse. Esto puede pasar en áreas de oyamel y pino-oyamel debido a la mayor carga de MLC encontrada. Sin embargo, es poco probable que el fuego logre la ignición de los combustibles pesados por la poca cobertura de las acículas al suelo y su baja flamabilidad limitando el avance del fuego; además, el tamaño de acículas de oyamel limita la ventilación del aire entre las acículas reduciendo la propagación del fuego (Cornelissen et al., 2017). Los arbustos pueden influir en el comportamiento del fuego aumentando el riesgo del avance vertical del fuego y en la ignición de los combustibles pesados, por lo que es importante identificar las áreas de mayor riesgo de incendio de acuerdo a la carga y la altura de los arbustos. En definitiva, un incendio forestal provocaría alta mortalidad de árboles presentándose hasta varios años después del incendio forestal (Bär et al., 2018; Varner et al., 2021), incluso CONSUME indica que más del 50% de consumo corresponde al dosel. Los resultados obtenidos por las quemas sugieren que en áreas de oyamel con presencia de pinos puede haber efectos sobre la dinámica y el régimen de los incendios forestales, como menciona Van Altena et al. (2012), que las invasiones ecológicas de especies flamables pueden afectar la dinámica de los incendios forestales.

3.6.2. Emisión de gases de efecto invernadero

La emisión de gases presentó relación positiva con el consumo de combustibles, la cual dependió de la carga de combustible. De igual manera el comportamiento del fuego correlaciono positiva y significativamente con las emisiones. Por lo que el consumo y la emisión están en función de la carga de combustible y el comportamiento del fuego. Comparativamente, los bosques templados durante un incendio forestal emiten en promedio de 89, 1637, 3.92, 0.16, 2.51 gr kg⁻¹ de CO, CO₂, CH₄, NO₂, NO_x, respectivamente (Akagi et al., 2011). Para zonas montañosas de la Ciudad de México, Yokelson et al. (2007, 2011) encontró emisión de 82.9 y 102.6, 1603 y 1662, 4.96 y 5.70, 3.19 y 5.03, 3.66 y 7.44 gr kg⁻¹, respectivamente para cada gas mencionado anteriormente.

En quemas prescritas de bosque de pino con sotobosque la emisión encontrada por Yokelson et al. (2013) fue de 72.2, 1668, 3.01, 2.68, 2.55 gr kg⁻¹, respectivamente, de manera similar Akagi et al. (2014), encontró emisiones de 100.6, 1646.9 y 2.68 gr kg⁻¹ para CO, CO₂ y CH₄, respectivamente. Por otra parte, para la capa de hojarasca y el suelo orgánico la emisión encontrada por Urbanski (2014), fue de 271, 1305, 7.47, 0.67 gr kg⁻¹ en CO, CO₂, CH₄, NO_x, respectivamente. La baja emisión de N₂O y NO_x se debe a que la capa orgánica emite menor cantidad en comparación con la vegetación del sotobosque y el dosel de acuerdo a los resultados de Yokelson et al. (2013), Urbanski (2014) y Paton-Walsh et al. (2014).

Las emisiones obtenidas son bajas por kilogramo quemado. Pero aumentan de acuerdo a los estratos y la carga de combustible disponibles, incluso cuando más alejado está un incendio de una población urbana la emisión es mayor, a excepción de NO_x y NH₃ emitiendo mayor cantidad en áreas más cercana a zonas urbanas según Yokelson et al. (2011). Además de las emisiones de gases, el PM₁₀ y PM_{2.5} influyen en problemas respiratorios y cardiovasculares fuertes a muy fuertes como se ha encontrado en incendios de Norte América y Europa (Cascio, 2018; Rappold et al., 2017). Durante un incendio, la emisión es mayormente de CO₂ por la pérdida del almacenamiento de carbono en las plántulas, arbustos, MLC y capa orgánica (Miesel et al., 2018); además el mayor consumo en la fase de flama influye en la mayor emisión de CO₂ (Akagi et al., 2011; Paton-Walsh et al., 2014).

Para el caso de la RBMM se ha encontrado que en áreas dominados por *A. religiosa* y *Pinus* sp. es mayor el carbono aéreo que en áreas con *Quercus* sp. (Ramírez et al., 2019). Estas áreas coinciden con ser las que mayor consumo sufrirían en caso de un incendio de acuerdo a lo que se obtuvo en CONSUME. Esto por la carga disponible, pero considerando que puede variar de acuerdo a los combustibles del sotobosque en las dominancias arbóreas, así como influir en la emisión de gases, por lo que es crucial conocer la carga por tipo de combustible, humedad de combustible e incluso la topografía como menciona Kasischke y Hoy (2012) y Fernandes y Loureiro (2013).

3.6.3. Ecuaciones de predicción

Las ecuaciones de consumo de la capa de hojarasca están determinadas fuertemente por la carga de combustibles antes de la quema, tal como lo indica Brewer et al. (2013), Fernandes y Loureiro (2013), Wright (2013), y Prichard et al. (2017). Las variables predictoras de los modelos se determinan en campo, antes y durante un incendio o quema prescrita. Sin embargo, solo se consideró la capa de hojarasca, por lo que considerar todos los estratos el consumo y las emisiones aumentarían considerablemente. Para quemas prescritas o incendios forestales los modelos de consumo obtenidos pueden subestimar el consumo debido a que no se integró la humedad de los combustibles y la topografía, las cuales influyen en el comportamiento y permanencia del fuego definiendo el consumo.

Crear modelos de predicción es complejo ya que los variables predictores de consumo incluyen la carga de combustibles antes del incendio, la humedad de hojarasca, la densidad aparente de la hojarasca, la temperatura del ambiente, la humedad relativa, la energía liberada por el fuego, el tipo de vegetación, el área basal del rodal y en quemas prescritas la temporada en la que se realiza (Knapp et al., 2005; Reid et al., 2012) e inclusive al incluir la estación del año se tienen r^2 muy altas (Wright, 2013).

Las ecuaciones de predicción de emisión obtenidos consideran la carga de combustible antes de la quema, el porcentaje de consumo y la altura de la flama. Esta última es una variable que puede definir la intensidad de calor liberado en la línea de fuego y tiene alta correlación con el consumo ($r=0.77$, $p<0.001$), por lo que su integración en la ecuación aumenta la adopción del uso del modelo. La generación de las ecuaciones indicó la importancia de conocer con precisión el consumo de combustible para estimar las emisiones, ya que estas varían de acuerdo a la región y clima, por lo que es necesario tener ecuaciones regionales de predicción (Prichard et al., 2017). De manera que, nuestras ecuaciones al ser empíricas deben considerarse conservadoras al no integrar otros factores y estratos del sotobosque, y ser aplicables en condiciones similares a la RBMM y estén en el rango de los datos de este trabajo.

3.7. CONCLUSIONES

El consumo y la emisión por la quema de la capa de hojarasca entre pino-oyamel y pino-encino es similar. El factor de eficiencia de combustión y los residuos después de las quemas no variaron entre las dominancias arbóreas, además la pendiente no influyó en el consumo, factor de eficiencia de combustión y residuos. La carga de combustible antes de la quema, el factor de eficiencia de combustión y el comportamiento del fuego fueron los predictores significativos para el consumo de combustible, mientras que el porcentaje de consumo, la carga de combustible antes de la quema y la altura de la flama fueron los predictores de la emisión.

La consideración de los estratos del sotobosque predijo el consumo y la emisión en relación al aumento de la carga de combustible disponible en las dominancias arbóreas y a la humedad de combustibles. Por lo que oyamel presentaría mayor consumo y emisión seguida por pino-oyamel y pino-encino. Con todos los estratos es mayor el consumo y emisión en el dosel, seguido por el MLC y los arbustos; además de mayor consumo en la fase de flama seguida por la fase humeante.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN GENERAL

El comportamiento del fuego en un incendio forestal es dinámico, con liberación de energía variando de acuerdo a la distribución y características de los combustibles forestales. Los incendios forestales tienen la capacidad de consumir grandes cantidades de combustibles forestales y de emisiones de GEI a la atmosfera. Un incendio forestal inicia en los combustibles forestales ligeros al ser las más susceptibles a la ignición (Cornelissen et al., 2017; Grootemaat et al., 2017); además estas definen principalmente el comportamiento superficial del fuego (Figura 22), debido a su baja densidad aparente y la mayor aireación (Grootemaat et al., 2017; Morgan et al., 2015).

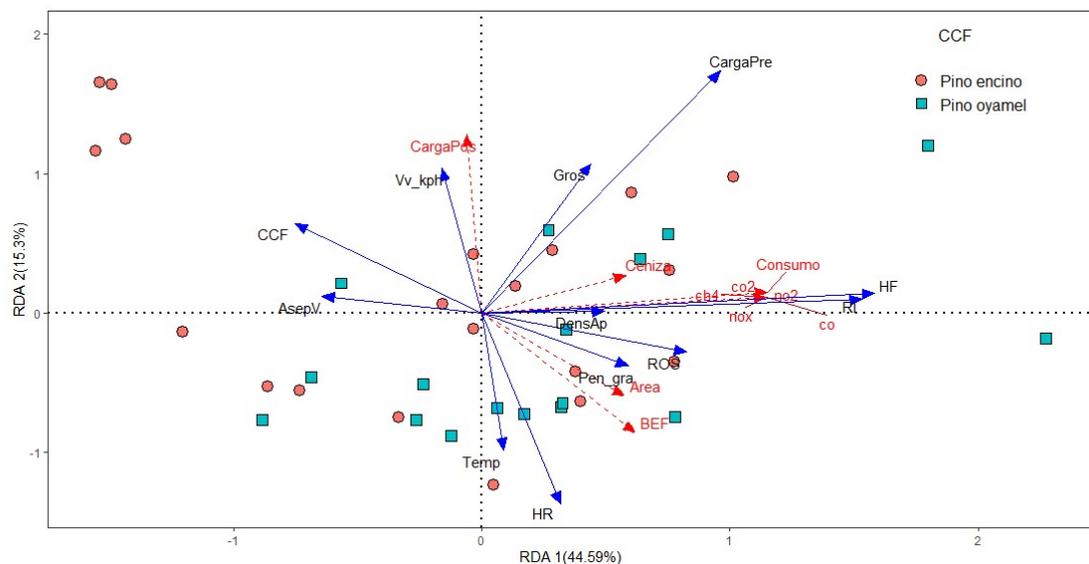


Figura 22. Biplot de las características de los combustibles, consumo y emisión de GEI de las quemadas de acículas explicando 59.89 % y $r^2=0.56$. Los variables predictoros son las dominancias arbóreas o camas de combustibles forestales (CCF), carga de la cama de hojarasca prequemada (CargaPre), grosor de la cama de hojarasca (Gros), densidad aparente de la cama de hojarasca (DensAp), pendientes en grado (Pen_gra), la humedad relativa (HR), temperatura (Temp), ángulo de separación del fuego al combustible prequemado (AsepV), tasa de propagación (ROS), altura de la flama (HF), longitud de la flama (LF). Los variables de respuesta son la carga posquemada (CargaPos), área quemada corregida (Area), consumo de la cama de hojarasca (Consumo), la ceniza producida (Ceniza), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), dióxido de nitrógeno (NO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x).

Las hojas y acículas largas al ser más vigorosas representan áreas de mayor carga en las zonas forestales (Kreye et al., 2020; Morgan et al., 2015). Por lo que, las características de los combustibles de las áreas boscosas con pino son más flamables (Morgan et al., 2021) y sensibles a la ignición aumentando el potencial del comportamiento superficial (Figura 23).

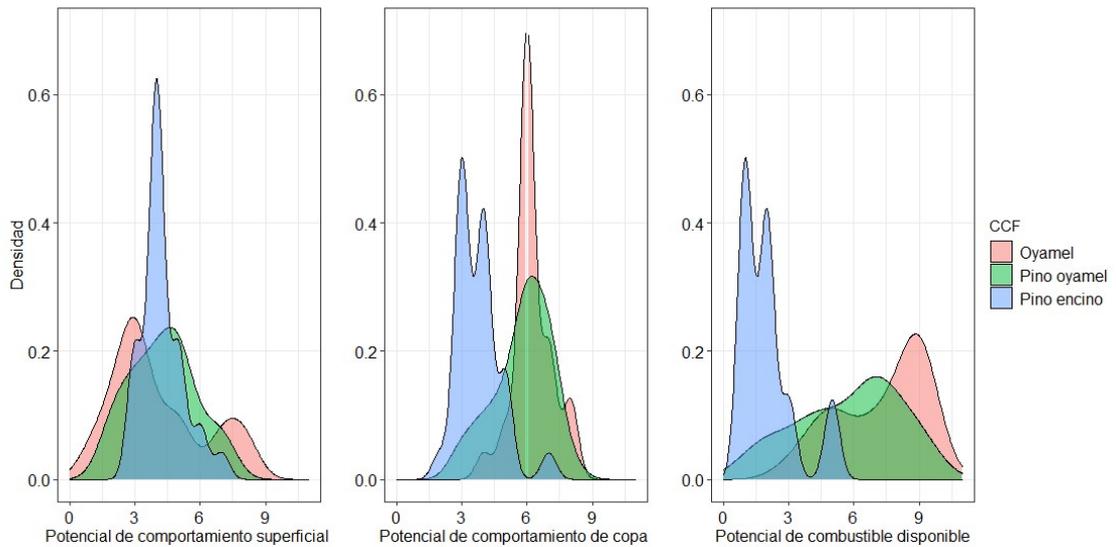


Figura 23. Distribuciones de la densidad de frecuencias del potencial el fuego obtenido por Fuel Fire Tools para las dominancias arbóreas o camas de combustibles forestales evaluados de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (n=84). Los valores del eje x indican el potencial de 0 como potencia nula a 9 como potencial muy alto.

La influencia de los asentamientos rurales sobre las áreas boscosas con dominancia de pino-encino puede reducir la carga de combustibles leñosos, debido a su extracción como leña. Sin embargo, en las áreas de mayor influencia humana se ha presentado mayor número de incendios forestales (Farfán et al., 2018). Esto ha influido en la fragmentación de ecosistemas con diferentes grados de conservación, como encontraron Ramírez et al. (2019) en el ejido Carpinteros, Donaciano Ojeda y Francisco Serrato ubicadas dentro de la RBMM. La heterogeneidad de la vegetación influye en la heterogeneidad de la capa de hojarasca definiendo la variación del comportamiento del fuego e intensidad liberada respecto a las áreas con un solo tipo de especie. La heterogeneidad de vegetación puede influir en la presencia de islas con hojarasca sin quemarse

(Figura 24a), lo cual se ha observado en incendios forestales y quemas prescritas (Hiers et al., 2020). Esto beneficiaría a las plantas y animales sirviendo como un área de refugio durante un incendio forestal (Meddens et al., 2018).

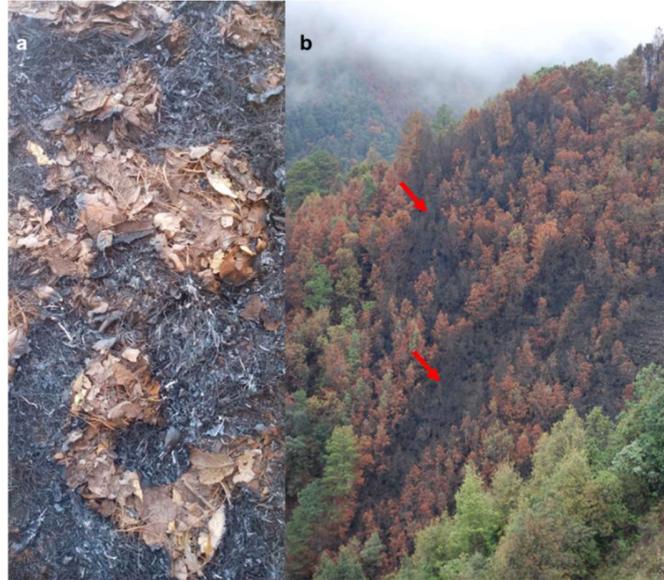


Figura 24. a) Islas de combustibles no quemadas en las quemas de la capa de hojarasca de pino-oyamel y b) diferente intensidad de incendio forestal ocurrido 2018 en el Ejido Angangueo mostrando efectos visibles en la coloración de dosel y carbonización del dosel (flechas rojas).

La alta carga del MLC de 1000 h en las tres dominancias arbóreas aumenta considerablemente la carga total y el potencial de combustible disponible para pino-oyamel y oyamel. Estas dominancias arbóreas al estar ubicadas cerca o dentro de la zona núcleo de la RBMM indican que la carga de los combustibles pesados aumenta de acuerdo a la altitud y grado de conservación de la RBMM, así como la zonificación, las actividades de manejo forestal y las restricciones para la extracción de material leñoso (Hernández-Moreno et al., 2020; SEMARNAP 2000).

El mayor porcentaje del área quemado en pino-oyamel es debido a que en las áreas con acículas de mayor longitud como las de pinos son más flamables; estas acículas al depositarse en el suelo no se compactan y permiten mayor ventilación facilitando la propagación del fuego (Cornelissen et al., 2017). A esto se suma la pendiente, que para la RBMM cerca del 50% del territorio corresponde a áreas pronunciadas y casualmente en estas áreas es donde se tiene mayor grado de

conservación (Carlón-Allende et al., 2015). Por lo que si se combinan estos factores aumentaría el comportamiento del fuego, principalmente en los cañones donde la propagación aumenta significativamente respecto a las áreas planas (Viegas et al., 2021). Esto provocaría variación de los efectos del fuego hacia el arbolado con efectos visibles de alta carbonización del dosel, como lo ocurrido en el incendio de 2018 en área muy pronunciada de pino-encino (Figura 24b). Además, los estratos del sotobosque influyen significativamente en el comportamiento del fuego, por ejemplo; los arbustos pueden aumentar considerablemente la transferencia de calor por convección y radiación (Zhou et al., 2005). Un aumento de la intensidad liberada aumenta el consumo del sotobosque (Figura 25) y mayor lesión al dosel como difusión de la xilema, carbonización del dosel y muerte del árbol (Varner et al., 2021).

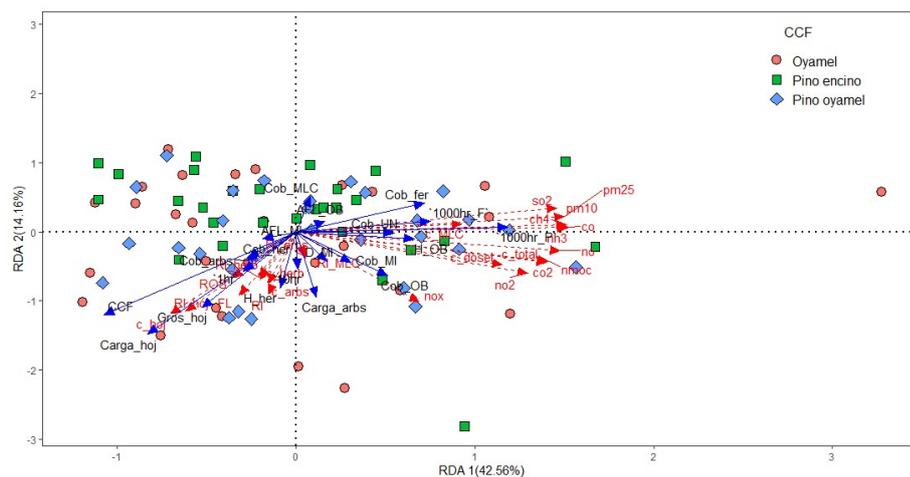


Figura 25. Biplot de las características de los combustibles de todos los estratos, consumo y emisión de GEI predichos por Fuel Fire Tools explicando 56.72% y $r^2= 0.75$. Los variables predictoras corresponden a las características de los combustibles son las tres dominancias arbóreas o camas de combustibles forestales (CCF), cobertura de dosel estrato I (Cob_OB: $H>32$), altura del estrato I (H_OB), altura de fuste limpio del estrato I (AFL_OB), cobertura de dosel del estrato II (Cob_MI: $20>H<32$), altura de fuste limpio del estrato II (AFL_MI), diámetro normal del estrato II (D_MI), cobertura de dosel del estrato III (Cob_UN: $H<20$), cobertura de arbusto (Cob_arbs), carga de arbusto (Carga_arb), cobertura de herbáceas (Cob_her), altura de herbáceas (H_her), cobertura del material leñoso caído (Cob_MLC), MLC de 1h (1hr), MLC de 1000 h firmes (1000hr_F), MLC de 1000 h podridos (1000hr_P), grosor de capa de hojarasca (Gros_hoj), carga de capa de hojarasca (Carga_hoj), carga de capa de fermentación (Carga_fer);

Los variables del comportamiento del fuego son tasa de propagación (ROS), longitud de flama (FL), intensidad de línea de fuego (RI), RI liberado en arbustos (RI_arbs), RI liberado en herbáceas (RI_herb), RI liberado por material leñoso (RI_MLC), RI liberado por la capa de hojarasca (RI_hoj). Los variables de respuesta son consumo total (c_total), consumo del dosel (c_dosel), consumo de arbusto (c_arbs), consumo de herbácea (c_herb), consumo del material leñoso (c_MLC), consumo de capa de hojarasca (c_hoj), consumo de capa de fermentación (c_fer); para las emisiones corresponden a monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), dióxido de azufre (SO₂), amoníaco (NH₃), hidrocarburos distintos del metano (NMOC), óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), partículas de 2.5 micras (PM_{2.5}), partículas de 10 micras (PM₁₀).

Identificar la flamabilidad de los arbustos es relevante ya que no todas las especies responden igual al fuego. Por ejemplo, *Arctostaphylos pungens* (manzanita) y *Juniperus* sp. son especies muy flamables aumentando considerablemente el comportamiento del fuego en un incendio forestal (Cole et al., 2011). Por lo tanto, es importante identificar la flamabilidad de las especies presentes en la RBMM, esto permitirá conocer el potencial del comportamiento del fuego y la probabilidad del avance vertical del fuego hacia la copa. Tal como encontramos, que en las áreas dominadas por pino-oyamel y oyamel el potencial de comportamiento del fuego superficial y del dosel es de medio a alto.

El consumo total de combustibles en un incendio forestal puede variar de acuerdo a las dominancias arbóreas presente, aun cuando no encontramos variación para la capa de hojarasca entre pino-encino y pino-oyamel. En general, el consumo es mayor en la fase de flama debido a la combustión de la capa de hojarasca, las herbáceas, los arbustos y el MLC ligero generando flamas con capacidad de carbonizar la parte inferior del dosel.

La pendiente influye significativamente en la ignición de los combustibles pesados, ya que en las áreas pronunciadas se presenta mayor velocidad de propagación por lo que la intensidad de calor liberado en el frente del fuego no es suficiente para la ignición en los MLC pesados. El MLC al estar expuesto al calor liberado se acelera la liberación de humedad influyendo en la rápida ignición de los combustibles. Sin embargo, una mayor velocidad del fuego puede evitar

el consumo total del MLC, lo cual no sucede en áreas planas donde la lenta velocidad de la propagación permite que los MLC se consuman en su totalidad. Finalmente, de acuerdo al consumo de combustible en la RBMM se emitirán grandes cantidades de GEI a la atmosfera. La mayor emisión se emitirá en el dosel si esta se consume, así como del MLC si se alcanzan a quemar. Pero la cantidad de emisiones puede variar de acuerdo a la especie según resultados de Safdari et al. (2020) quien encontró variación de la emisión de CH₄ entre especies. Por lo tanto, la RBMM al ser un gran reservorio de carbono (Hernández-Moreno et al., 2020; Ramírez et al., 2019) en caso de un incendio forestal el consumo y la liberación de GEI seria considerable y con mayor emisión de CO₂. La información de este trabajo en su conjunto indica la importancia de identificar la carga de combustibles por dominancias arbóreas en la RBMM ya que estos influyen en el comportamiento del fuego y los efectos posquema. Por lo que las dominancias arbóreas presentes en la RBMM se deben considerar como CC diferentes con potenciales de fuego diferentes en cada una de estas. Esto permitirá generar estrategias de manejo y tratamiento de combustibles de acuerdo a la CC, con el objetivo de reducir la carga de combustibles en áreas de mayor potencial del fuego para reducir los efectos negativos e integrarlas en planes futuros de manejo del fuego.

Se recomienda evaluaciones considerando todos los estratos del sotobosque y la edad del rodal para generar ecuaciones más precisas de acuerdo a la estructura de los bosques. Además, se deben de realizar más experimentos de consumo de combustibles en dominancias arbóreas mexicanas, así como realizar evaluaciones en quemas prescritas que se han implementado en los últimos años en México.

BIBLIOGRAFÍA

Agee, J. K. (1993). Fire ecology of Pacific Northwest forests. Island Press. Washington, USA.

- Agee, J. K., & Skinner, C. N. (2005). Basic principles of forest fuel reduction treatments. *Forest Ecology and Management*, 211(1-2), 83-96. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.01.034
- Akagi, S. K., Burling, I. R., Mendoza, A., Johnson, T. J., ... & Yokelson, R. J. (2014). Field measurements of trace gases emitted by prescribed fires in southeastern US pine forests using an open-path FTIR system. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(1), 199-215. DOI: 10.5194/acp-14-199-2014
- Akagi, S. K., Yokelson, R. J., Wiedinmyer, C., Alvarado, M. J., ... & Wennberg, P. O. (2011). Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(9), 4039-4072. DOI: 10.5194/acp-11-4039-2011
- Alexander, M. E., & Cruz, M. G. (2012). Graphical aids for visualizing Byram's fireline intensity in relation to flame length and crown scorch height. *The Forestry Chronicle*, 88(2), 185-190. DOI: 10.5558/TFC2012-035
- Alexander, M. E., & Cruz, M. G. (2017). Interdependencies between flame length and fireline intensity in predicting crown fire initiation and crown scorch height. *International Journal of Wildland Fire*, 26(4), 95-113. DOI: 10.1071/WF11001
- Alexander, M. E., Cruz, M. G., & Taylor, S. W. (2019). Crown Scorch Height. *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires*, 1-7. DOI: 10.1007/978-3-319-51727-8_72-1
- Amato, V. J. W., Lightfoot, D., Stropki, C., & Pease, M. (2013). Relationships between tree stand density and burn severity as measured by the Composite Burn Index following a ponderosa pine forest wildfire in the American Southwest. *Forest Ecology and Management*, 302, 71-84. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.03.015
- Anderson, W. R., Cruz, M. G., Fernandes, P. M., McCaw, L., ... van Wilgen, B. W. (2015). A generic, empirical-based model for predicting rate of fire spread in shrublands. *International Journal of Wildland Fire*, 24(4), 443-460. DOI: 10.1071/WF14130

- Andrade-Calva, F. N., & Arias-Perugachi, J. P. (2016). Cálculo de la absorción de carbono por ecuaciones alométricas y determinación del factor de equilibrio entre emisión y absorción de carbono en los 11 sumideros del D.M. de Quito. Tesis de licenciatura. Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. 73 pag.
- Andrews, P. L. (2012). Modeling wind adjustment factor and midflame wind speed for Rothermel's surface fire spread model. *USDA Forest Service - General Technical Report RMRS-GTR, 266*, 1-39. DOI: 10.2737/RMRS-GTR-266
- Andrews, P. L. (2014). Current status and future needs of the BehavePlus Fire Modeling System. *International Journal of Wildland Fire, 23*(1), 21-33. DOI: 10.1071/WF12167
- Bär, A., Nardini, A., & Mayr, S. (2018). Post-fire effects in xylem hydraulics of *Picea abies*, *Pinus sylvestris* and *Fagus sylvatica*. *New Phytologist, 217*(4), 1484-1493. DOI: 10.1111/NPH.14916
- Bentley, P. D., & Penman, T. D. (2017). Is there an inherent conflict in managing fire for people and conservation? *International Journal of Wildland Fire, 26*(6), 455-468. DOI: 10.1071/WF16150
- Boboulos, M., & Purvis, M. R. I. (2009). Wind and slope effects on ROS during the fire propagation in East-Mediterranean pine forest litter. *Fire Safety Journal, 44*(5), 764-769. DOI: 10.1016/j.firesaf.2009.03.006
- Bowman, D. M. J. S., Balch, J., Artaxo, P., Bond, W. J., ... & Swetnam, T. W. (2011). The human dimension of fire regimes on Earth. In *Journal of Biogeography* 38(12), 2223–2236. DOI: 10.1111/j.1365-2699.2011.02595.x
- Brewer, N. W., Smith, A. M. S., Hatten, J. A., Higuera, P. E., ... & Tinkham, W. T. (2013). Fuel moisture influences on fire-altered carbon in masticated fuels: An experimental study. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 118*(1), 30-40. DOI: 10.1029/2012JG002079
- Brower, L. P., Slayback, D. A., Jaramillo-López, P., Ramirez, I., ... & Fink, L. S. (2016). Illegal Logging: Of 10 Hectares of Forest in the Sierra Chincua Monarch Butterfly Overwintering Area in Mexico. *American Entomologist, 62*(2), 92-97. DOI: 10.1093/ae/tmw040

- Brower, L. P., Williams, E. H., Jaramillo-López, P., Kust, D. R., ... & Ramírez, M. I. (2017). Butterfly Mortality and Salvage Logging: from the March 2016 Storm in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve in Mexico. *American Entomologist*, 63(3), 151-164. DOI: 10.1093/ae/tmx052
- Brown, J. K. (1974). Handbook for inventorying downed woody material. Gen. Tech. Rep. INT-16. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 24 p. disponible en <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/28647>
- Burrows, N. D. (2001). Flame residence times and rates of weight loss of eucalypt forest fuel particles. *International Journal of Wildland Fire*, 10(2), 137-143. DOI: 10.1071/WF01005
- Byram, G. (1959). Combustion of forest fuels. In *Forest fire: control and use*. McGraw-Hill.
- Calleja P., B., López L., B., Méndez G., J., Ríos C., J. M., & Gutiérrez M., 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.
- Canfield, J. M., Linn, R. R., Sauer, J. A., Finney, M., & Forthofer, J. (2014). A numerical investigation of the interplay between fireline length, geometry, and rate of spread. *Agricultural and Forest Meteorology*, 189-190, 48–59. DOI: 10.1016/j.agrformet.2014.01.007
- Cannon, J. B., O'Brien, J. J., Loudermilk, E. L., Dickinson, M. B., & Peterson, C. J. (2014). The influence of experimental wind disturbance on forest fuels and fire characteristics. *Forest Ecology and Management*, 330, 294-303. DOI: 10.1016/j.foreco.2014.07.021
- Cansler, C. A., Hood, S. M., van Mantgem, P. J., & Varner, J. M. (2020). A large database supports the use of simple models of post-fire tree mortality for thick-barked conifers, with less support for other species. *Fire Ecology*, 16(1), 25. DOI: 10.1186/s42408-020-00082-0
- Cansler, C. A., Kane, V. R., Bartl-Geller, B. N., Churchill, D. J., ... & Larson, A. J. (2021). Postfire treatments alter forest canopy structure up to three decades

- after fire. *Forest Ecology and Management*, 119872. DOI: 10.1016/J.FORECO.2021.119872
- Cansler, C. A., Kane, V. R., Hessburg, P. F., Kane, J. T., ... & Larson, A. J. (2021). Previous wildfires and management treatments moderate subsequent fire severity. *Forest Ecology and Management*, 119764. DOI: 10.1016/J.FORECO.2021.119764
- Cansler, C. A., Swanson, M. E., Furniss, T. J., Larson, A. J., & Lutz, J. A. (2019). Fuel dynamics after reintroduced fire in an old-growth Sierra Nevada mixed-conifer forest. *Fire Ecology*, 15(1), 1-17. DOI: 10.1186/s42408-019-0035-y
- Cansler, S. M. H., J. M. V., P. van M., C. A., Varner, J. M., Mantgem, P. van, & Cansler, C. A. (2018). Fire and tree death: understanding and improving modeling of fire-induced tree mortality. *Environmental Research Letters*, 13(11), 113004. DOI: 10.1088/1748-9326/AAE934
- Cantú-Fernández, MX. (2013). Incendios de 2012 en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca: Caracterización y respuesta institucional. Tesis de licenciatura. UNAM. Morelia, Michoacán, México. 79 pag.
- Carlón A., T., Mendoza, M. E., Pérez-Salicrup, D. R., Villanueva-Díaz, J., & Lara, A. (2016). Climatic responses of *Pinus pseudostrobus* and *Abies religiosa* in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Central Mexico. *Dendrochronologia*, 38, 103-116. DOI: 10.1016/J.DENDRO.2016.04.002
- Carlón-Allende, T., Mendoza, M. E., Villanueva-Díaz, J., & Pérez-Salicrup, D. R. (2015). Análisis espacial del paisaje como base para muestreos dendrocronológicos: El caso de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México. *Madera Bosques*, 21(2), 11-22. DOI: 10.21829/myb.2015.212442.
- Cascio, W. E. (2018). Wildland Fire Smoke and Human Health. *The Science of the Total Environment*, 624, 586. DOI: 10.1016/J.SCITOTENV.2017.12.086
- Castagneri, D., Esposito, A., Bovio, G., Mazzoleni, S., ... & Ascoli, D. (2013). Fuel vertical structure affects fire sustainability and behaviour of prescribed burning in *Spartium junceum* shrublands. *Annals of Forest Science*, 70(8), 863–871. DOI: 10.1007/s13595-013-0327-3

- Cisneros-González, D., Zúñiga-Vásquez, J. M., & Pompa-García, M. (2018). Actividad del fuego en áreas forestales de México a partir de sensores remotos y su sensibilidad a la sequía. *Madera y Bosques*, 24(3). DOI: 10.21829/MYB.2018.2431687
- Cobian-Iñiguez, J., Aminfar, A., Weise, D. R., & Princevac, M. (2019). On the Use of Semi-empirical Flame Models for Spreading Chaparral Crown Fire. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 0, 50. DOI: 10.3389/FMECH.2019.00050
- Cochrane, M. A. (2009). Tropical Fire Ecology: Cambio climático, uso del suelo y dinámica de los ecosistemas. Springer-Praxis Books.645 pag.
- Cochrane, M. A., Moran, C. J., Wimberly, M. C., ... & Zhu, Z. (2012). Estimation of wildfire size and risk changes due to fuels treatments. *International Journal of Wildland Fire*, 21(4), 357–367. DOI: 10.1071/WF11079
- Cofer, W. R., Levine, J. S., Winstead, E. L., Stocks, B. J., ... & Pinto, J. P. (1993). Trace gas emissions from tropical biomass fires: Yucatan Peninsula, Mexico. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 27(12), 1903–1907. DOI: 10.1016/0960-1686(93)90295-A
- Cole, W. J., Dennis, M. H., Fletcher, T. H., & Weise, D. R. (2011). The effects of wind on the flame characteristics of individual leaves. *International Journal of Wildland Fire*, 20(5), 657–667. DOI: 10.1071/WF10019
- Collins, L., Bradstock, R. A., & Penman, T. D. (2014). Can precipitation influence landscape controls on wildfire severity? A case study within temperate eucalypt forests of south-eastern Australia. *International Journal of Wildland Fire*, 23(1), 9–20. DOI: 10.1071/WF12184
- CONAFOR. (2021). Reporte semanal de Incendios 2021. Disponible en <https://www.gob.mx/conafor/documentos/reporte-semanal-de-incendios>
- Cornejo-Tenorio, G., Casas, A., Farfán, B., Villaseñor, J. L., & Ibarra-Manríquez, G. (2003). Flora y Vegetación de las zonas núcleo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México. *Botanical Sciences*, 73, 43. DOI: 10.17129/botsci.1678.

- Cornejo-Tenorio, G., & Ibarra-Manríquez, G. (2017). Flora of the core zones of the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico: composition, geographical affinities and beta diversity. *Botanical Sciences*, 95(1), 103–129. DOI: 10.17129/BOTSCI.803
- Cornelissen, J. H. C., Grootemaat, S., Verheijen, L. M., Cornwell, W. K., ... & Aerts, R. (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., Alexander, M. E., & Plucinski, M. P. (2017). The effect of silvicultural treatments on fire behaviour potential in radiata pine plantations of South Australia. *Forest Ecology and Management*, 397, 27–38. DOI: 10.1016/J.FORECO.2017.04.028
- Cruz, M. G., McCaw, W. L., Anderson, W. R., & Gould, J. S. (2013). Fire behaviour modelling in semi-arid mallee-heath shrublands of southern Australia. *Environmental Modelling and Software*, 40, 21–34. DOI: 10.1016/j.envsoft.2012.07.003
- Davies, G. M., Legg, C. J., Smith, A. A., & MacDonald, A. (2019). Development and participatory evaluation of fireline intensity and flame property models for managed burns on *Calluna*-dominated heathlands. *Fire Ecology 2019 15:1*, 15(1), 1–15. DOI: 10.1186/S42408-019-0046-8
- Davies, G. M., Legg, C. J., Smith, A. A., & MacDonald, A. J. (2009). Rate of spread of fires in *Calluna vulgaris* -dominated moorlands. *Journal of Applied Ecology*, 46(5), 1054–1063. DOI: 10.1111/j.1365-2664.2009.01681.x
- SEMARNAP (2000). Decreto por el que se declara área natural protegida, con el carácter de reserva de la biosfera, la región denominada Mariposa Monarca. 109 pag.
- Díaz-Hernández, D., Rodríguez-Laguna, R., Rodríguez-Trejo, D. A., Acevedo-Sandoval, A., & Maycotte-Morales, C. (2021). *Pinus montezumae* regeneration dynamics after a forest fire and a prescribed burn. *Botanical Sciences*, 99(1), 58–66 DOI: 10.17129/BOTSCI.2634

- Diffendorfer, J. E., Thogmartin, W. E., Drum, R., & Schultz, C. B. (2020). Editorial: North American Monarch Butterfly Ecology and Conservation. *Frontiers in Ecology and Evolution* 8. DOI: 10.3389/fevo.2020.576281
- Drury, S. A., Larkin, N. S., Strand, T. T., Huang, S., ... & Raffuse, S. M. (2014). Intercomparison of fire size, fuel loading, fuel consumption, and smoke emissions estimates on the 2006 tripod fire, Washington, USA. *Fire Ecology*, 10(1), 56–83. DOI: 10.4996/fireecology.1001056
- El Houssami, M., Lamorlette, A., Morvan, D., ... & Simeoni, A. (2018). Framework for submodel improvement in wildfire modeling. *Combustion and Flame*, 190, 12–24. DOI: 10.1016/J.COMBUSTFLAME.2017.09.038
- España-Boquera, M. L., Champo-Jiménez, O., & Uribe-Salas, M. D. (2019). Fenología de la Reserva Biósfera Mariposa Monarca con series de índice de área foliar. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 6(18), 435–449. DOI: 10.19136/era.a6n18.1941.
- Espinosa, J., Rodríguez De R., Ó., Madrigal, J., ... & Hernando, C. (2020). Use of Bayesian Modeling to Determine the Effects of Meteorological Conditions, Prescribed Burn Season, and Tree Characteristics on Litterfall of *Pinus nigra* and *Pinus pinaster* Stands. *Forests*, 11(9), 1006. DOI: 10.3390/f11091006
- Farfán G., M., Pérez-Salicrup, D. R., Flamenco-Sandoval, A., Nicasio-Arzeta, S., ... & Ramírez R., I. (2018). Modeling anthropic factors as drivers of wildfire occurrence at the Monarch Butterfly Biosphere. *Madera Bosques*, 24(3)(e2431591), 1–15. DOI: 10.21829/myb.2018.2431591
- Fernandes, P. M., & Loureiro, C. (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
- Fernández-Alonso, J. M., Vega, J. A., Jiménez, E., Ruiz-González, A. D., & Álvarez-González, J. G. (2017). Spatially modeling wildland fire severity in pine forests of Galicia, Spain. *European Journal of Forest Research*, 136(1), 105–121. DOI: 10.1007/s10342-016-1012-5

- Flannigan, M., Stocks, B., Turetsky, M., & Wotton, M. (2009). Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest. *Global Change Biology*, *15*(3), 549–560. DOI: 10.1111/J.1365-2486.2008.01660.X
- Flores-Garnica, J. G., & Benavides S., J. D. D. (1995). Efectos de las quemas prescritas sobre algunas características del suelo en un rosal de pino. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *20*(77).
- Flores-Garnica, J. G., Wong-González, J. C., & Paz-Pellat, F. (2018). Camas de combustibles forestales y carbono en México. *Madera y Bosques*, *24*(e2401893). DOI: 10.21829/myb.2018.2401893.
- Francos, M., Úbeda, X., Pereira, P., & Alcañiz, M. (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
- Fry, D. L., Stevens, J. T., Potter, A. T., Collins, B. M., & Stephens, S. L. (2018). Surface fuel accumulation and decomposition in old-growth pine-mixed conifer forests, Northwestern Mexico. *Fire Ecology*, *14*(2), 1–15. DOI: 10.1186/s42408-018-0017-5
- Glitzenstein, J. S., Streng, D. R., Achtemeier, G. L., Naeher, L. P., & Wade, D. D. (2006). Fuels and fire behavior in chipped and unchipped plots: Implications for land management near the wildland/urban interface. *Forest Ecology and Management*, *236*(1), 18–29. DOI: 10.1016/j.foreco.2006.06.002
- Gould, J. S., Lachlan-McCaw, W., & Phillip-Cheney, N. (2011). Quantifying fine fuel dynamics and structure in dry eucalypt forest (*Eucalyptus marginata*) in Western Australia for fire management. *Forest Ecology and Management*, *262*(3), 531–546. DOI: 10.1016/j.foreco.2011.04.022
- Grabinski, Z. S., Sherriff, R. L., & Kane, J. M. (2017). Controls of reburn severity vary with fire interval in the Klamath Mountains, California, USA. *Ecosphere*, *8*(11), e02012. DOI: 10.1002/ECS2.2012
- Graciano-Ávila, G., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O. A., González-Tagle, M. A., ... & Buendía-Rodríguez, E. (2019). Estimación de volumen,

- biomasa y contenido de carbono en un bosque de clima templado frío de Durango, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 42(2), 119-127.
- Grootemaat, S., Wright, I. J., Bodegom, P. M. van, & Cornelissen, J. H. C. (2017). Scaling up flammability from individual leaves to fuel beds. *Oikos*, 126(10), 1428–1438. DOI: 10.1111/OIK.03886
- Hanberry, B. B., Bragg, D. C., & Hutchinson, T. F. (2018). A reconceptualization of open oak and pine ecosystems of eastern North America using a forest structure spectrum. *Ecosphere*, 9(10), e02431. DOI: 10.1002/ecs2.2431
- Harris, L. B., Drury, S. A., Farris, C. A., & Taylor, A. H. (2021). Prescribed fire and fire suppression operations influence wildfire severity under severe weather in Lassen Volcanic National Park, California, USA. *International Journal of Wildland Fire*, 30(7), 536–551. DOI: 10.1071/WF20163
- Harris, L., & Taylor, A. H. (2017). Previous burns and topography limit and reinforce fire severity in a large wildfire. *Ecosphere*, 8(11), e02019. DOI: 10.1002/ECS2.2019
- He, T., & Lamont, B. B. (2018). Baptism by fire: the pivotal role of ancient conflagrations in evolution of the Earth's flora. *National Science Review*, 5(2), 237–254. DOI: 10.1093/NSR/NWX041
- Hernández-Moreno, J. A., Velázquez-Martínez, A., Fierros-González, A. M., Gómez-Guerrero, A., ... & Vera-Castillo, J. A. G. (2020). Aboveground biomass and carbon estimation in stands with and without forest management at the Monarch Butterfly Biosphere Reserve. *Madera y Bosques*, 26(1). DOI: 10.21829/myb.2020.2611802
- Hessburg, P. F., Salter, R. B., & James, K. M. (2007). Re-examining fire severity relations in pre-management era mixed conifer forests: Inferences from landscape patterns of forest structure. *Landscape Ecology*, 22(1), 5–24. DOI: 10.1007/s10980-007-9098-2
- Hiers, J. K., O'Brien, J. J., Varner, J. M., Butler, B. W., ... & Yedinak, K. M. (2020). Prescribed fire science: the case for a refined research agenda. *Fire Ecology* 2020 16:1, 16(1), 1–15. DOI: 10.1186/S42408-020-0070-8

- Hille, M., & Den Ouden, J. (2005). Fuel load, humus consumption and humus moisture dynamics in Central European Scots pine stands. *International Journal of Wildland Fire*, 14(2), 153–159. DOI: 10.1071/WF04026
- Hood, S. M., Varner, J. M., Van Mantgem, P., & Cansler, C. A. (2018). Fire and tree death: Understanding and improving modeling of fire-induced tree mortality. *Environmental Research Letters*, 13(11). DOI: 10.1088/1748-9326/aae934
- Huitrón G., S. (2019). Evaluación de las actividades de restauración ecológica en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México 2012-2017. Tesis de licenciatura. UNAM. Estado de México, México. 114 pag.
- Ivanova, G. A., Kukavskaya, E. A., Ivanov, V. A., Conard, S. G., & McRae, D. J. (2020). Fuel characteristics, loads and consumption in Scots pine forests of central Siberia. *Journal of Forestry Research*, 31(6), 2507–2524. DOI: 10.1007/s11676-019-01038-0
- Jardel-Peláez, E. J., Quintero-Gradilla, S. D., Lomelí-Jiménez, A. J., Graf-Pérez, J. D., & Rodríguez-Gómez, M. (2018). Informe: Generación de modelos de comportamiento del fuego para los tipos de combustibles forestales de México (251694). CONAFOR-CONACYT-UNAM-UdeG, México. 31 pag.
- Johnson, M. C., Halofsky, J. E., & Peterson, D. L. (2013). Effects of salvage logging and pile-and-burn on fuel loading, potential fire behaviour, fuel consumption and emissions. *International Journal of Wildland Fire*, 22(6), 757–769. DOI: 10.1071/WF12080
- Johnston, J. D., Olszewski, J. H., Miller, B. A., Schmidt, M. R., ... & Ellsworth, L. M. (2021). Mechanical thinning without prescribed fire moderates wildfire behavior in an Eastern Oregon, USA ponderosa pine forest. *Forest Ecology and Management*, 501, 119674. DOI: 10.1016/J.FORECO.2021.119674
- Kasischke, E. S., & Hoy, E. E. (2012). Controls on carbon consumption during Alaskan wildland fires. *Global Change Biology*. 18(2), 685–699. DOI: 10.1111/J.1365-2486.2011.02573.X

- Keane, R. E. (2015). *Wildland fuel fundamentals and applications*. Springer International Publishing. Montana, USA. 191 pag. DOI: 10.1007/978-3-319-09015-3
- Keeley, J. E. (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 18(1), 116–126. DOI: 10.1071/WF07049
- Knapp, E. E., Keeley, J. E., Ballenger, E. A., & Brennan, T. J. (2005). Fuel reduction and coarse woody debris dynamics with early season and late season prescribed fire in a Sierra Nevada mixed conifer forest. *Forest Ecology and Management*, 208(1–3), 383–397. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.01.016
- Kreye, J. K., Brewer, N. W., Morgan, P., Varner, J. M., ... & Ottmar, R. D. (2014). Fire behavior in masticated fuels: A review. *Forest Ecology and Management*, 314, 193–207. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.11.035
- Kreye, J. K., Kane, J. M., Varner, J. M., & Hiers, J. K. (2020). Radiant heating rapidly increases litter flammability through impacts on fuel moisture. *Fire Ecology*, 16(1), 1–10. DOI: 10.1186/s42408-020-0067-3
- Kreye, J. K., Kobziar, L. N., & Camp, J. M. (2014). Immediate and short-term response of understory fuels following mechanical mastication in a pine flatwoods site of Florida, USA. *Forest Ecology and Management*, 313, 340–354. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.10.034
- Kreye, J. K., Kobziar, L. N., & Zipperer, W. C. (2013). Effects of fuel load and moisture content on fire behaviour and heating in masticated litter-dominated fuels. *International Journal of Wildland Fire*, 22(4), 440–445. DOI: 10.1071/WF12147
- Kreye, J. K., Varner, J. M., Dugaw, C. J., Engber, E. A., & Quinn-Davidson, L. N. (2017). Patterns of duff ignition and smoldering beneath old *Pinus palustris*: Influence of tree proximity, moisture content, and ignition vectors. *Forest Science*, 63(2), 165–172. DOI: 10.5849/forsci.2016-058
- Kreye, J. K., Varner, J. M., & Knapp, E. E. (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
- Liu, J. C., Pereira, G., Uhl, S. A., Bravo, M. A., & Bell, M. L. (2015). A systematic review of the physical health impacts from non-occupational exposure to wildfire smoke. *Environmental Research*, 0, 120. DOI: 10.1016/J.ENVRES.2014.10.015
- Lydersen, J. M., Collins, B. M., Knapp, E. E., Roller, G. B., & Stephens, S. (2015). Relating fuel loads to overstorey structure and composition in a fire-excluded Sierra Nevada mixed conifer forest. *International Journal of Wildland Fire*, 24(4), 484–494. DOI: 10.1071/WF13066
- Martínez-Torres, H. L., Castillo, A., Ramírez, M. I., Pérez-Salicrup, D. R. (2016). The importance of the traditional fire knowledge system in a subtropical montane socio-ecosystem in a protected natural area. *International Journal of Wildland Fire*, 25(9), 911–921. DOI: 10.1071/WF15181
- Matsypura, D., Prokopyev, O. A., & Zahar, A. (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
- McAllister, S., Grenfell, I., Hadlow, A., Jolly, W. M., ... & Cohen, J. (2012). Piloted ignition of live forest fuels. *Fire Safety Journal*, 51, 133–142. DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.04.001
- McCull-Gausden, S. C., & Penman, T. D. (2019). Pathways of change: Predicting the effects of fire on flammability. *Journal of Environmental Management*, 232, 243–253. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.11.063
- McGinnis, T. W., Keeley, J. E., ... & Roller, G. B. (2010). Fuel buildup and potential fire behavior after stand-replacing fires, logging fire-killed trees and herbicide shrub removal in Sierra Nevada forests. *Forest Ecology and Management*, 260(1), 22–35. DOI: 10.1016/j.foreco.2010.03.026
- McKemey, M., Rangers, T. B., Patterson, M. (Lesley), Hunter, J., ... & Reid, N. (2021). Indigenous cultural burning had less impact than wildfire on the threatened Backwater grevillea (*Grevillea scortechinii* subsp. sarmentosa)

- while effectively decreasing fuel loads. *International Journal of Wildland Fire*, 30(10), 745–756. DOI: 10.1071/WF20135
- Meddens, A. J. H., Kolden, C. A., Lutz, J. A., Smith, A. M. S., ... & Krawchuk, M. A. (2018). Fire Refugia: What Are They, and Why Do They Matter for Global Change? *BioScience*, 68(12), 944–954. DOI: 10.1093/BIOSCI/BIY103
- Meraz C., G. O. (2020). Efectos de ventarrones en la estructura del dosel en la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca. Tesis de licenciatura. UNAM, Michoacán, México. 191 pag.
- Miesel, J., Reiner, A., Ewell, C., Maestrini, B., & Dickinson, M. (2018). Quantifying changes in total and pyrogenic carbon stocks across fire severity gradients using active wildfire incidents. *Frontiers in Earth Science*, 6, 1. DOI: 10.3389/feart.2018.00041
- Miloua, H. (2019). Fire behavior characteristics in a pine needle fuel bed in northwest Africa. *Journal of Forestry Research*, 30(3), 959–967. DOI: 10.1007/s11676-018-0676-8
- Moody, J. A., Shakesby, R. A., Robichaud, P. R., ... & Martin, D. A. (2013). Current research issues related to post-wildfire runoff and erosion processes. *Earth-Science Reviews* 122, 10–37. DOI: 10.1016/j.earscirev.2013.03.004
- Morandini, F., Perez-Ramirez, Y., Tihay, V., Santoni, P. A., & Barboni, T. (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
- Morandini, F., Silvani, X., Dupuy, J. L., & Susset, A. (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., Simeoni, A., Santoni, P. A., & Balbi, J. H. (2005). A model for the spread of fire across a fuel bed incorporating the effects of wind and slope. *Combustion Science and Technology* 177 (7), 1381–1418. DOI: 10.1080/00102200590950520

- Morfin-Ríos, J. E., Jardel P., E. J., Alvarado C., E., & Michel-Fuentes, J. M. (2012). Caracterización y cuantificación de combustibles forestales. CONAFOR-UdeG, Jalisco, México. 113 pag.
- Morgan-Varner, J., Kane, J. M., Kreye, J. K., & Engber, E. (2015). The flammability of forest and woodland litter: A synthesis. *Current Forestry Reports*, 1(2), 91–99. DOI: 10.1007/S40725-015-0012-X/FIGURES/1
- Navarrete, J. L., Ramírez, M. I., & Pérez-Salicrup, D. R. (2011). Logging within protected areas: Spatial evaluation of the monarch butterfly biosphere reserve, Mexico. *Forest Ecology and Management*, 262(4), 646–654. DOI: 10.1016/J.FORECO.2011.04.033
- Ng, J., North, M. P., Arditti, A. J., Cooper, M. R., & Lutz, J. A. (2020). Topographic variation in tree group and gap structure in Sierra Nevada mixed-conifer forests with active fire regimes. *Forest Ecology and Management*, 472, 118220. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118220
- O'Brien, J. J., Hiers, J. K., Varner, J. M., Hoffman, C. M., ... & Butler, B. W. (2018). Advances in Mechanistic Approaches to Quantifying Biophysical Fire Effects. *Current Forestry Reports* 4(4), 161–177. DOI: 10.1007/S40725-018-0082-7
- Oliveira, L. A., Lopes, A. G., Baliga, B. R., Almeida, M., & Viegas, D. X. (2014). Numerical prediction of size, mass, temperature and trajectory of cylindrical wind-driven firebrands. *International Journal of Wildland Fire*, 23(5), 698–708. DOI: 10.1071/WF13080
- Ottmar, R. D. (2014). Wildland fire emissions, carbon, and climate: Modeling fuel consumption. *Forest Ecology and Management*, 317, 41–50. DOI: 10.1016/J.FORECO.2013.06.010
- Ottmar, R. D., Hudak, A. T., Prichard, S. J., Wright, C. S., ... & Vihnanek, R. E. (2016). Pre-fire and post-fire surface fuel and cover measurements collected in the south-eastern United States for model evaluation and development - RxCADRE 2008, 2011 and 2012. *International Journal of Wildland Fire*, 25(1), 10–24. DOI: 10.1071/WF15092
- Ottmar, R. D., Sandberg, D. V., Riccardi, C. L., & Prichard, S. J. (2007). An overview of the Fuel Characteristic Classification System-Quantifying,

- classifying, and Creating fuelbeds for resource planning. *Canadian Journal of Forest Research*, 2393(37), 2383–2393. DOI: 10.1139/X07-077
- Paton-Walsh, C., Smith, T. E. L., Young, E. L., Griffith, D. W. T., & Guérette, A. (2014). New emission factors for Australian vegetation fires measured using open-path Fourier transform infrared spectroscopy - Part 1: Methods and Australian temperate forest fires. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(20), 11313–11333. DOI: 10.5194/ACP-14-11313-2014
- Pausas, J. G., & Keeley, J. E. (2019). Wildfires as an ecosystem service. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 17(5), 289–295. DOI: 10.1002/fee.2044
- Pérez-Salicrup, D. R., Cantú-Fernández, M., Jaramillo-López, P. F., Carlón-Allende, T., ... & Martínez-Torres, L. (2016). Restauración de un proceso: el fuego en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca en los estados de México y Michoacán. In *Experiencias mexicanas en la restauración de los ecosistemas*. CRIM-UNAM-UAEM-Conabio. 577 pag.
- Pettinari, M. L., & Chuvieco, E. (2017). Fire behavior simulation from global fuel and climatic information. *Forests*, 8(6), 179. DOI: 10.3390/f8060179
- Pimont, F., Dupuy, J. L., Linn, R. R. (2012). Coupled slope and wind effects on fire spread with influences of fire size: a numerical study using FIRETEC. *International Journal of Wildland Fire*, 21(7), 828–842. DOI: 10.1071/WF11122
- Pretzsch, H. (2009). *Forest dynamics, growth and yield: From measurement to model*. Springer. Alemania. 664 pag. DOI: 10.1007/978-3-540-88307-4
- Prichard, S. J., Kennedy, M. C., Wright, C. S., Cronan, J. B., & Ottmar, R. D. (2017). Predicting forest floor and woody fuel consumption from prescribed burns in southern and western pine ecosystems of the United States. *Data in Brief*, 15, 742–746. DOI: 10.1016/J.DIB.2017.10.029
- Quevedo, A., Schwarzkopf, T., García, C., & Jerez, M. (2016). Ambiente de luz del sotobosque de una selva nublada andina: Estructura del dosel y estacionalidad climática. *Revista de Biología Tropical*, 64(4), 1699–1707. DOI: 10.15517/RBT.V64I4.21861.

- Ramírez, M. I., Benet, D., Pérez-Salicrup, D. R., Skutsch, M., & Venegas-Pérez, Y. (2019). Community participation for carbon measurement in forests of the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 25(3), 333–352. DOI: 10.5154/r.rchscfa.2018.06.044
- Rappold, A. G., Reyes, J., Pouliot, G., Cascio, W. E., & Diaz-Sanchez, D. (2017). Community vulnerability to health impacts from wildland fire smoke exposure. *Environmental Science & Technology*, 51(12), 6674. DOI: 10.1021/ACS.EST.6B06200
- Regos, A., Aquilué, N., López, I., Codina, M., ... & Brotons, L. (2016). Synergies Between Forest Biomass Extraction for Bioenergy and Fire Suppression in Mediterranean Ecosystems: Insights from a Storyline-and-Simulation Approach. *Ecosystems*, 19(5), 786–802. DOI: 10.1007/S10021-016-9968-Z/FIGURES/6
- Reid, C. E., Brauer, M., Johnston, F. H., Jerrett, M., ... & Elliott, C. T. (2016). Critical Review of Health Impacts of Wildfire Smoke Exposure. *Environmental Health Perspectives*, 124(9), 1334. DOI: 10.1289/EHP.1409277
- Reid M., A., Robertson M., K., & Hmielowski L., T. (2012). Predicting litter and live herb fuel consumption during prescribed fires in native and old-field upland pine communities of the southeastern United States. *Canadian Journal of Forest Research*, 42(8), 1611–1622. DOI: 10.1139/X2012-096
- Rodrigues, A., Ribeiro, C., Raposo, J., Viegas, D. X., & André, J. (2019). Effect of Canyons on a Fire Propagating Laterally Over Slopes. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 0, 41. DOI: 10.3389/FMECH.2019.00041
- Rodríguez T., D. A., Martínez M., P. M., & Martínez L., P. J. (2019). Fire effects on the trees of a tropical pine forest and a tropical dry forest at Villaflores, Chiapas, Mexico. *Ciencia Florestal*, 29(3), 1033-1047. DOI: 10.5902/1980509833952
- Rodríguez T., D. A. (2008). Fire regimes, fire ecology, and fire management in Mexico. *Ambio*, 37(7–8), 548–556. DOI: 10.1579/0044-7447-37.7.548

- Rodríguez T., D. A., Pulido L., J. A., Martínez M., P., Martínez L., P. J., & Monjarás V., N. A. (2018). Análisis comparativo de quemas prescritas aplicadas a encinares tropicales. *Agrociencia* 52(6), 783–801.
- Rodríguez-Trejo, D. A. (2014). Incendios de Vegetación. Su Ecología, Manejo e Historia. Volumen 1. Chapingo-Colegio de postgraduado. México. 1705 pag.
- Rojas-García, F., De Jong, B. H. J., Martínez-Zurimendí, P., & Paz-Pellat, F. (2015). Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *Annals of Forest Science*, 72, 835–864. DOI: 10.1007/s13595-015-0456-y
- Rossa, C. G., & Fernandes, P. M. (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. R Foundation for Statistical Computing. Version 4.0.3. Boston, USA.
- Rubio C., E. A., González T., M. A., Benavides S., J. D., Chávez D., A. A., & Xelhuantzi C., J. (2017). Relación entre necromasa, composición de especies leñosas y posibles implicaciones del cambio climático en bosques templados. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13, 2601–2614. DOI: 10.29312/remexca.v0i13.486. [In Spanish]
- Russell-Smith, J., Murphy, B. P., Meyer, C. P. (Mick), Cook, G. D., ... & Peter, B. (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
- Sáenz-Ceja, J. E., & Pérez-Salicrup, D. R. (2019). Dendrochronological reconstruction of fire history in coniferous forests in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico. *Fire Ecology*, 15, 1–17. DOI: 10.1186/s42408-019-0034-z
- Safdari, M. S., Amini, E., Weise, D. R., & Fletcher, T. H. (2020). Comparison of pyrolysis of live wildland fuels heated by radiation vs. convection. *Fuel*, 268, 117342. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117342

- Salgado-Terrones, O., Borda-Niño, M., & Ceccon, E. (2017). Uso y disponibilidad de leña en la región de La Montaña en el estado de Guerrero y sus implicaciones en la unidad ambiental. *Madera Bosques*, 23(3), 121–135. DOI: 10.21829/myb.2017.2331473.
- Salis, M., Del Giudice, L., Arca, B., Ager, A. A., ... & Duce, P. (2018). Modeling the effects of different fuel treatment mosaics on wildfire spread and behavior in a Mediterranean agro-pastoral area. *Journal of Environmental Management*, 212, 490–505. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.02.020
- Sánchez-Monroy, X., Mell, W., Torres-Arenas, J., & Butler, B. W. (2019). Fire spread upslope: Numerical simulation of laboratory experiments. *Fire Safety Journal*, 108, 102844. DOI: 10.1016/J.FIRESAF.2019.102844
- Sandberg, D. V., Riccardi, C. L., & Schaaf, M. D. (2007). Fire potential rating for wildland fuelbeds using the Fuel Characteristic Classification System. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(12), 2456–2463. DOI: 10.1139/X07-093
- Santín, C., & Doerr, S. H. (2016). Fire effects on soils: The human dimension. In *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 371, 20150171. DOI: 10.1098/rstb.2015.0171
- Santín, C., Doerr, S. H., Merino, A., Bryant, R., & Loader, N. J. (2016). Forest floor chemical transformations in a boreal forest fire and their correlations with temperature and heating duration. *Geoderma*, 264, 71–80. DOI: 10.1016/j.geoderma.2015.09.021
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2009a). Norma Oficial Mexicana Nom 152-semarnat-2006. Que establece los lineamientos, criterios y especificaciones de los contenidos de los programas de manejo forestal para el aprovechamiento de recursos forestales maderables.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2009b). 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.

- Silvani, X., Morandini, F., Dupuy, J. L., Susset, A., ... & Lambert, O. (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
- SNM. (n.d.). Servicio Meteorológico Nacional. Retrieved 28 August 2021, from <https://smn.conagua.gob.mx/es/>
- Tappeiner, J. C., Maguire, D. A., Harrington, T. B., & Bailey, J. D. (2015). *Silviculture and ecology of western U.S. forests*. Second edition. Oregon State University Press. USA. 446 pag.
- Taylor, A. H., Airey-Lauvaux, C., Estes, B., Harris, L., & Skinner, C. N. (2020). Spatial patterns of nineteenth century fire severity persist after fire exclusion and a twenty-first century wildfire in a mixed conifer forest landscape, Southern Cascades, USA. *Landscape Ecology*, 35(12), 2777–2790. DOI: 10.1007/S10980-020-01118-1/FIGURES/5
- Tihay, V., Morandini, F., Santoni, P. A., Perez-Ramirez, Y., & Barboni, T. (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
- Urbanski, S. (2014). Wildland fire emissions, carbon, and climate: Emission factors. *Forest Ecology and Management*, 317, 51–60. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.05.045
- Van Altena, C., van Logtestijn, R., Cornwell, W., & Cornelissen, H. (2012). Species composition and fire: non-additive mixture effects on ground fuel flammability. *Frontiers in Plant Science*, 0, 63. DOI: 10.3389/FPLS.2012.00063
- Van Wagner, C. E. (1982). Practical aspects of the line intersect method. In Information Report PI-X-12E.C.E. Canadian Forestry Service, Maritimes Forest Research Centre.
- Varnier, J. M., Hood, S. M., Aubrey, D. P., Yedinak, K., ... & Rowell, E. M. (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
- Varner, J. M., Kane, J. M., Kreye, J. K., & Shearman, T. M. (2021). Litter Flammability of 50 Southeastern North American Tree Species: Evidence for Mesophication Gradients Across Multiple Ecosystems. *Frontiers in Forests and Global Change*, 4, 153. DOI: 10.3389/FFGC.2021.727042/BIBTEX
- Vaughan, M. C., Hagan, D. L., Bridges, W. C., Dickinson, M. B., & Coates, T. A. (2021). How do fire behavior and fuel consumption vary between dormant and early growing season prescribed burns in the southern Appalachian Mountains? *Fire Ecology* 2021 17:1, 17(1), 1–16. DOI: 10.1186/S42408-021-00108-1
- Vidal, O., & Rendón-Salinas, E. (2014). Dynamics and trends of overwintering colonies of the monarch butterfly in Mexico. *Biological Conservation*, 180, 165–175. DOI: 10.1016/j.biocon.2014.09.041
- Viegas, D. X., Rodrigues, A., Abouali, A., Almeida, M., & Raposo, J. (2021). Fire downwind a flat surface entering a canyon by lateral spread. *Fire Safety Journal*, 122, 103349. DOI: 10.1016/J.FIRESAF.2021.103349
- Wang, H. H., Finney, M. A., Song, Z. L., Wang, Z. S., & Li, X. C. (2021). Ecological techniques for wildfire mitigation: Two distinct fuelbreak approaches and their fusion. *Forest Ecology and Management*, 495, 119376. DOI: 10.1016/J.FORECO.2021.119376
- Weir, J. R., & Limb, R. F. (2013). Seasonal variation in flammability characteristics of *Quercus marilandica* and *Quercus stellata* leaf litter burned in the laboratory. *Fire Ecology*, 9(3), 80–88. DOI: 10.4996/fireecology.0903080
- Werth, P. A., Potter, B. E., Alexander, M. E., Clements, C. B., ... & Parsons, R. A. (2016). Synthesis of knowledge of extreme fire behavior: Volume 2 for Fire Behavior Specialists, Researchers, and Meteorologists. General Technical Report PNW-GTR-891, 2, 258.
- Werth, P. A., Potter, B. E., Clements, C. B., Finney, M. A., ... & McCallister, S. S. (2011). Synthesis of knowledge of extreme fire behavior: Volume I for fire

- managers. USDA Forest Service - General Technical Report PNW-GTR, 1 (854), 144. DOI: 10.2737/PNW-GTR-854
- Wright, C. S. (2013). Models for Predicting Fuel Consumption in Sagebrush-Dominated Ecosystems. *Rangeland Ecology & Management*, 66(3), 254–266. DOI: 10.2111/REM-D-12-00027.1
- Yang, Z., & Chen, H. X. (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., Burling, I. R., Gilman, J. B., Warneke, C., ... & Weise, D. R. (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(1), 89–116. DOI: 10.5194/acp-13-89-2013
- Yokelson, R. J., Burling, I. R., Urbanski, S. P., Atlas, E. L., ... & Wold, C. E. (2011). Trace gas and particle emissions from open biomass burning in Mexico. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(14), 6787–6808. DOI: 10.5194/ACP-11-6787-2011
- Yokelson, R. J., Crouse, J. D., DeCarlo, P. F., Karl, T., ... Shetter, R. (2009). Emissions from biomass burning in the Yucatan. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(15), 5785–5812. DOI: 10.5194/ACP-9-5785-2009
- Yokelson, R. J., Urbanski, S. P., Atlas, E. L., Toohey, D. W., ... & Hao, W. M. (2007). Emissions from forest fires near Mexico City. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(21), 5569–5584. DOI: 10.5194/acp-7-5569-2007
- Zhang, C., Tian, H., Wang, Y., Zeng, T., & Liu, Y. (2010). Predicting response of fuel load to future changes in climate and atmospheric composition in the Southern United States. *Forest Ecology and Management*, 260(4), 556–564. DOI: 10.1016/j.foreco.2010.05.012
- Zhou, X., Mahalingam, S., & Weise, D. (2005). Modeling of marginal burning state of fire spread in live chaparral shrub fuel bed. *Combustion and Flame*, 143(3), 183–198. DOI: 10.1016/J.COMBUSTFLAME.2005.05.013

ANEXOS

Anexo 1. Potencial del fuego, consumo y emisión de gases de efecto invernadero y otros elementos a la atmosfera (metano (CH₄), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), amoníaco (NH₃), hidrocarburos distintos del metano (NMOC), óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO₃), óxido de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂), partículas de 10 micras (PM₁₀), partículas de 2.5 micras (PM_{2.5})) obtenidos de Fuel Fire Tools para los sitios muestreados de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.

Cama de combustible	Latitud Norte	Longitud Oeste	Biomasa viva	Carga (Ton ha ⁻¹)				IPF	ROS (m min ⁻¹)	FL (m)	IR (kw m ²)	Consumo Total (Ton ha ⁻¹)	Emisión Total (Kg ha ⁻¹)
				MLC	Hojarasca	Fermentación	Total						
Pino-encino	19°22'00.8"	100°19'01.2"	4.65	20.07	0.72	1.53	26.97	542	14.92	3.92	805.1	72.77	129176
Encino	19°22'11.6"	100°18'23.6"	3.33	13.87	0.82	1.52	19.54	531	7.37	1.26	250.36	32.24	57236
Pino-encino	19°30'33.1"	100°18'19.5"	2.97	11.23	0.76	1.17	16.13	642	15.58	2.34	301.05	50.28	89270
Pino-encino	19°29'50.2"	100°18'26.2"	4.69	9.06	0.63	2.23	16.60	541	2.23	1.11	404.81	39.59	70266
Pino-oyamel	19°23'18.3"	100°13'18.0"	2.86	33.67	0.32	1.87	38.71	877	7.82	1.36	201.93	64.47	116545
Oyamel	19°23'10.7"	100°13'45.7"	0.00	163.57	0.25	1.60	165.42	569	1.91	0.42	52.39	142.28	257094
Oyamel	19°23'16.7"	100°13'04.8"	6.65	48.36	0.28	1.89	57.19	879	5.08	1.43	321.66	83.32	150597
Pino-oyamel	19°23'26.1"	100°12'29.5"	5.21	37.98	1.11	2.13	46.43	679	11.51	2.34	446.62	94.69	171160
Pino-oyamel	19°31'15.6"	100°10'30.5"	3.00	2.52	0.62	1.57	7.71	631	4.3	0.9	166.84	42.55	76942
Oyamel	19°31'34.4"	100°11'20.2"	3.10	22.05	0.00	2.11	27.26	479	1	0.69	316.16	83.35	150667
Oyamel	19°34'09.7"	100°14'36.0"	8.02	7.10	0.25	1.64	17.01	875	11.82	2.11	405.87	48.94	88490
Pino-oyamel	19°33'15.4"	100°14'53.3"	3.83	5.95	0.44	1.05	11.27	766	4.04	1.22	280.52	55.06	99464
Pino-oyamel	19°33'50.2"	100°14'59.5"	3.11	1.18	0.60	0.77	5.66	664	7.15	1.01	153.38	34.01	61508
Pino-oyamel	19°41'45.9"	100°14'23.5"	6.63	43.80	0.64	1.36	52.44	535	6.98	1.52	386.08	46.92	84811

Encino	19°42'25.2"	100°19'44.7"	3.28	101.61	0.79	1.57	107.25	755	9.18	1.71	280.24	72.12	128013
Pino-encino	19°42'54.1"	100°19'16.1"	3.71	41.00	0.46	0.94	46.10	633	7.1	1.94	387.05	42.88	76135
Pino-encino	19°40'18.5"	100°20'04.7"	3.63	26.35	0.62	1.36	31.96	443	3.6	1.02	246.12	76.96	136611
Pino-encino	19°40'16.2"	100°20'04.6"	4.31	13.05	1.01	1.11	19.47	525	1.6	0.78	335.68	92.00	163323
Pino-encino	19°40'27.2"	100°20'03.6"	4.14	15.02	0.62	0.89	20.67	752	9.58	2.99	990.75	53.42	94839
Oyamel	19°40'05.6"	100°18'12.9"	3.62	13.11	0.31	1.03	18.07	943	9.71	1.13	131.18	27.84	50308
Pino-oyamel	19°40'10.7"	100°18'28.1"	3.90	7.41	0.35	0.93	12.59	965	6.9	1.11	165.82	45.33	81949
Pino-encino	19°39'14.4"	100°19'32.0"	3.97	1.67	0.77	1.14	7.55	531	2.05	0.7	250.36	32.24	57236
Pino-encino	19°42'29.5"	100°21'25.9"	5.92	3.22	1.37	1.29	11.80	542	10.22	2.15	424.83	56.00	99424
Encino	19°57'52.5"	100°08'56.9"	0.00	4.60	1.40	0.63	6.63	531	1.95	0.94	525.75	27.55	48910
Encino	19°57'44.9"	100°08'13.6"	7.77	1.95	1.38	0.91	12.00	552	3.88	1.23	486.51	87.52	155352
Encino	19°57'27.6"	100°07'59.0"	7.21	4.59	0.89	0.84	13.53	541	6.58	1.82	582.38	44.88	79661
Encino	19°57'59.8"	100°08'40.4"	0.00	5.73	1.07	0.63	7.43	531	3.1	1.02	414.25	27.35	48534
Encino	19°58'59.3'	100°08'52.9"	5.50	1.72	0.90	0.47	8.60	441	3.2	1.12	326.08	23.49	41708
Encino	19°58'30.2"	100°08'43.8"	6.14	2.69	0.67	0.76	10.27	553	3.63	1.35	436.84	51.29	91061
Pino-oyamel	19°42'35.6"	100°17'10.7"	6.17	0.99	1.09	2.07	10.32	874	12.55	2.03	372.07	38.60	69810
Encino	19°58'00.1"	100°08'30.2"	7.77	11.81	1.10	0.88	21.55	575	6.69	1.69	522.98	113.99	202377
Encino	19°57'56.7"	100°08'07.3"	0.00	5.86	0.89	0.53	7.29	641	4.29	1.07	321.65	24.12	42828
Oyamel	19°58'19.8"	100°08'02.7"	3.11	3.68	0.12	1.52	8.43	267	0.79	0.54	286.74	54.18	97983
Oyamel	19°58'17.0"	100°07'53.9"	6.27	3.01	0.54	1.51	11.33	685	4.22	1.2	308.1	42.48	76828
Oyamel	19°58'24.1"	100°07'57.9"	2.76	8.65	0.72	1.65	13.77	687	2.61	0.86	214.06	60.46	109305
Oyamel	19°58'27.1"	100°08'50.8"	0.00	2.24	0.51	1.33	4.09	464	1.63	0.8	316.53	34.50	62382
Encino	19°58'41.1"	100°08'51.7"	3.58	4.40	0.85	0.57	9.40	431	2	0.88	297.63	48.87	86770
Oyamel	19°58'22.5"	100°07'43.1"	0.00	1.67	0.51	1.33	3.52	368	1.29	0.54	127.51	67.25	121600
Encino	19°59'03.3"	100°08'56.4"	4.51	6.88	0.69	0.89	12.97	641	3.72	0.9	241.64	40.44	71778
Pino-oyamel	19°33'21.1"	100°17'27.0"	5.32	2.95	0.62	1.68	10.58	442	0.83	0.56	336.14	17.60	31816
Pino-oyamel	19°33'20.5"	100°17'42.5"	5.62	1.69	0.56	1.83	9.70	542	2.14	0.9	352.11	21.95	39702

Pino-oyamel	19°33'10.2"	100°17'51.4"	8.11	1.85	0.55	1.81	12.33	666	2.32	1.09	493.63	49.43	89380
Pino-oyamel	19°33'08.1"	100°17'47.1"	8.11	25.09	0.42	2.05	35.66	777	3.06	1.06	363.33	58.71	106110
Pino-oyamel	19°33'04.9"	100°17'54.2"	7.67	0.57	0.55	1.90	10.69	667	2.61	1	389.67	55.62	100552
Pino-oyamel	19°33'03.7"	100°16'47.9"	7.67	0.85	0.55	1.57	10.64	664	4.95	1.33	362.49	38.67	69909
Oyamel	19°33'02.9"	100°16'33.6"	6.17	1.59	0.26	0.58	8.59	479	1.42	0.85	435.66	108.63	196449
Pino-oyamel	19°32'36.6"	100°17'51.2"	5.78	1.73	0.54	2.34	10.39	369	1.85	0.93	422.12	82.63	149426
Pino-oyamel	19°32'34.2"	100°17'56.2"	5.32	2.28	0.52	2.17	10.29	377	0.67	0.6	440.03	58.06	105004
Pino-oyamel	19°32'53.0"	100°17'37.6"	5.78	48.25	0.64	2.52	57.18	458	2.26	1.28	595.48	72.81	131599
Oyamel	19°33'03.9"	100°17'09.0"	5.33	1.75	0.23	1.96	9.27	464	0.83	0.61	370.78	33.27	60152
Pino-oyamel	19°22'08.0"	100°15'08.3"	6.64	10.19	0.80	3.61	21.25	569	7.45	1.98	524.62	72.90	131820
Oyamel	19°22'32.7"	100°14'50.5"	4.72	5.09	0.62	3.36	13.79	457	4.97	1.39	394.4	63.87	115460
Oyamel	19°22'33.5"	100°14'53.1"	5.33	32.70	0.49	3.53	42.05	455	2.24	1.05	428.26	45.28	81873
Oyamel	19°22'34.3"	100°14'54.7"	0.00	115.00	0.24	2.90	118.14	469	1.36	0.36	54.48	95.63	172862
Oyamel	19°22'57.1"	100°15'05.3"	6.17	2.30	0.28	1.95	10.70	368	0.71	0.6	443.2	64.14	115959
Oyamel	19°22'56.9"	100°15'07.5"	6.17	5.28	0.27	2.24	13.95	367	1.43	0.95	512.44	57.50	103952
Oyamel	19°23'02.3"	100°15'17.8"	6.17	4.86	0.24	2.29	13.55	369	0.38	0.52	507.62	83.82	151562
Oyamel	19°22'48.0"	100°15'05.4"	6.17	22.13	0.23	2.48	31.01	357	0.39	0.51	500.88	62.07	112231
Oyamel	19°22'02.3"	100°15'04.3"	6.17	0.83	0.21	2.48	9.69	269	0.25	0.31	266.93	79.27	143322
Oyamel	-	-	0.00	4.61	0.57	3.74	8.92	344	1.25	0.68	222.43	29.41	53174
Encino	19°44'01.8"	100°16'17.0"	4.88	5.15	1.25	2.60	13.88	631	10.86	2.52	581.98	30.02	53288
Oyamel	19°42'24.1"	100°17'16.2"	0.00	1.47	0.28	1.20	2.96	665	2.67	0.91	308.27	47.28	85486
Pino	19°43'10.0"	100°17'28.3"	4.72	11.21	1.19	3.02	20.14	532	6.76	1.39	267.61	44.48	78957
Pino-encino	19°43'01.9"	100°18'54.9"	7.23	1.67	1.10	2.12	12.11	431	1.44	0.84	446.37	48.20	85574
Pino-encino	19°42'47.8"	100°19'08.3"	15.91	8.48	1.15	3.33	28.87	532	1.97	1.16	669.9	62.03	110133
Pino-encino	19°42'57.1"	100°18'59.9"	9.99	3.23	0.93	2.17	16.31	432	1.61	0.95	506.41	55.17	97953
Pino	19°42'48.8"	100°18'48.1"	8.33	8.03	1.50	4.17	22.03	532	5.97	1.73	533.89	58.96	104650
Pino	19°42'11.2"	100°21'25.9"	8.26	1.93	0.96	1.20	12.35	863	8.78	1.86	440.86	28.38	51314

Pino	19°43'39.9"	100°16'24.7"	11.57	1.95	1.31	3.56	18.39	842	5.47	1.54	496.27	60.39	107227
Pino-oyamel	19°41'49.8"	100°19'30.6"	5.78	7.22	0.65	2.92	16.57	652	3.45	1.09	349.29	25.58	46228
Pino-oyamel	19°42'37.2"	100°17'29.1"	6.64	11.88	0.86	2.04	21.42	577	2.14	0.89	344.4	59.02	106712
Pino-oyamel	19°42'0.40"	100°18'33.3"	7.51	12.45	0.63	3.14	23.73	578	1.98	1.02	496.48	67.07	121279
Pino-oyamel	19°41'54.8"	100°19'24.0"	0.00	16.29	0.82	2.39	19.49	467	1.04	0.6	316.67	55.95	101164
Pino-oyamel	19°43'05.8"	100°17'15.5"	8.02	42.56	1.21	0.91	52.70	579	7.06	2.02	543.51	77.56	140204
Oyamel	19°42'40.0"	100°16'53.4"	5.93	5.08	0.63	1.00	12.64	469	2.51	1.22	487.36	85.03	153747
Oyamel	19°42'26.7"	100°17'15.2"	9.12	36.13	0.33	1.35	46.93	889	5.14	1.26	308.41	89.94	162593
Pino-oyamel	19°41'21.7"	100°18'18.8"	6.52	3.47	0.78	3.46	14.23	455	1.34	0.85	505.69	42.41	76686
Oyamel	19°41'18.0"	100°18'46.3"	8.87	5.98	0.48	2.26	17.58	469	1.42	0.91	562.64	105.38	190553
Oyamel	19°42'12.2"	100°17'09.4"	10.74	17.04	1.04	1.90	30.72	979	6.04	1.75	554.25	76.91	139070
Oyamel	19°41'24.6"	100°18'54.6"	5.32	12.34	0.42	2.16	20.23	666	3.8	1.16	361.14	55.82	100907
Oyamel	19°41'30.3"	100°18'45.4"	5.62	9.95	0.23	2.67	18.47	469	2.19	1.08	500.8	74.33	134395
Oyamel	19°41'31.0"	100°18'42.6"	6.17	0.66	0.60	2.91	10.33	569	1.53	0.86	461.28	77.88	140804
Oyamel	19°41'29.1"	100°19'10.2"	0.00	18.33	0.33	1.67	20.33	467	1.8	0.75	279.59	61.11	110478
Pino-oyamel	19°42'58.1"	100°17'03.5"	9.17	21.77	1.04	1.43	33.40	685	4.22	1.2	308.1	42.48	76828

Anexo 2. Comportamiento del fuego, consumo y emisión de gases en las quemas de camas de hojarasca realizadas. DA= densidad aparente, VV= velocidad del viento, T= temperatura, HR= humedad relativa, ROS= velocidad de propagación, FL= longitud de flama, IR= intensidad de línea de fuego, AF= ángulo de separación de la flama con los combustibles prequemados, CH₄= metano, CO= monóxido de carbono, CO₂= dióxido de carbono, NO₂= óxido nitroso, NO_x= óxido de nitrógeno, BEF= factor de eficiencia de combustión.

Cama de combustible	Pendiente (°)	Carga (kg m ²)		DA (kg m ³)	Grosor (cm)	Tiempo atmosférico			Comportamiento del fuego					Emisión de gases de efecto invernadero (gr kg ⁻¹)					Consumo (kg m ²)	Ceniza (kg m ²)	
		Prequemada	Posquemada			VV (km hr ⁻¹)	T (°C)	HR (%)	ROS (m min ⁻¹)	FL (m)	IR (kw m ²)	HF (m)	AF (°)	CH ₄	CO	CO ₂	NO ₂	NO _x			BEF
Oyamel	10	0.04	0.04	2.0	8	1.97	31	55	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.000
Oyamel	20	0.04	0.04	4.0	7	1.75	31	55	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.000
Oyamel	20	0.04	0.04	4.0	7	1.75	31	55	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.000
Oyamel	10	0.04	0.04	2.0	8	2.15	31	55	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.000
Oyamel	10	0.02	0.02	1.0	8	2.15	31	55	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.000
Oyamel	10	0.04	0.04	4.0	7	1.75	31	55	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.000
Oyamel	0	0.24	0.12	12.0	8	3.47	23	25	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.11	3.31	0.0000	0.0000	0.50	0.12	0.000
Oyamel	10	0.04	0.04	4.0	7	1.75	30	55	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.000
Oyamel	20	0.24	0.24	12.0	8	3.85	25	16	0.28	0.04	0.00	0.01	70	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.000
Oyamel	20	0.10	0.10	10.0	7	1.87	27	16	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.000
Oyamel	0	0.36	0.18	36.0	7	2.87	28	25	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.17	4.97	0.0000	0.0000	0.50	0.18	0.000
Oyamel	20	0.26	0.07	13.0	8	4.85	28	35	0.30	0.04	17.39	0.04	90	0.04	1.77	51.26	0.0000	0.0005	0.71	0.19	0.000
Oyamel	0	0.34	0.17	17.0	8	2.17	27	25	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.16	4.69	0.0000	0.0000	0.50	0.17	0.000
Oyamel	20	0.44	0.21	5.5	14	1.85	32	35	0.54	0.05	39.10	0.06	52	0.28	11.03	318.84	0.0003	0.0031	0.53	0.23	0.003
Oyamel	0	0.44	0.22	44.0	7	5.37	24	25	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.01	0.21	6.08	0.0000	0.0001	0.50	0.22	0.000

Oyamel	20	0.38	0.11	7.6	11	3.96	30	35	0.71	0.12	59.52	0.09	83	0.29	11.37	328.46	0.0003	0.0032	0.70	0.26	0.006
Pino-encino	0	0.63	0.38	6.3	16	0.57	31	16	0.33	0.13	25.84	0.10	81	0.54	21.25	614.15	0.0006	0.0061	0.39	0.25	0.003
Pino-encino	0	0.75	0.20	7.5	16	4.60	31	35	0.44	0.25	75.81	0.26	98	0.58	22.93	662.81	0.0006	0.0065	0.64	0.48	0.070
Pino-encino	0	0.77	0.73	7.7	16	3.43	26	16	0.05	0.04	0.55	0.01	104	0.01	0.28	8.17	0.0000	0.0001	0.04	0.03	0.006
Pino-encino	20	0.30	0.10	6.0	11	1.66	32	35	0.80	0.13	48.80	0.11	73	0.32	12.77	369.05	0.0003	0.0036	0.64	0.19	0.006
Pino-encino	20	0.85	0.51	8.5	16	3.25	28	35	0.47	0.19	49.62	0.18	79	0.66	25.97	750.63	0.0007	0.0074	0.36	0.30	0.038
Pino-encino	20	0.70	0.42	10.0	13	2.90	29	35	0.75	0.14	65.13	0.18	73	0.56	22.38	646.74	0.0006	0.0064	0.37	0.26	0.020
Pino-encino	10	0.56	0.24	5.6	16	4.53	25	25	0.43	0.18	42.53	0.16	86	0.35	13.94	402.93	0.0004	0.0040	0.52	0.29	0.028
Pino-encino	10	0.70	0.34	7.0	16	4.53	25	25	0.73	0.25	81.20	0.23	70	0.40	15.71	453.89	0.0004	0.0045	0.47	0.33	0.031
Pino-encino	10	0.23	0.13	4.6	11	1.39	30	55	0.28	0.10	8.66	0.09	92	0.19	7.51	216.99	0.0002	0.0021	0.38	0.09	0.012
Pino-encino	10	0.23	0.03	4.6	11	0.51	30	55	0.23	0.06	14.46	0.06	100	0.43	17.00	491.40	0.0005	0.0048	0.81	0.19	0.012
Pino-encino	10	0.43	0.16	4.3	16	1.04	30	55	0.39	0.18	33.02	0.15	97	0.56	22.39	646.98	0.0006	0.0064	0.57	0.25	0.023
Pino-encino	10	0.21	0.13	4.2	11	0.85	31	55	0.27	0.09	6.36	0.09	97	0.15	5.94	171.58	0.0002	0.0017	0.31	0.07	0.010
Pino-encino	0	0.95	0.56	9.5	16	2.57	27	16	0.45	0.17	54.77	0.17	86	0.82	32.67	944.24	0.0009	0.0093	0.38	0.36	0.030
Pino-encino	0	0.54	0.52	10.8	11	3.85	26	16	0.04	0.05	0.27	0.03	79	0.00	0.19	5.39	0.0000	0.0001	0.04	0.02	0.004
Pino-encino	0	0.82	0.78	8.2	16	0.73	26	16	0.07	0.04	0.97	0.03	124	0.02	0.79	22.81	0.0000	0.0002	0.05	0.04	0.003
Pino-encino	0	0.69	0.62	6.9	16	4.56	26	16	0.13	0.03	2.67	0.02	78	0.03	1.27	36.56	0.0000	0.0004	0.10	0.07	0.000
Pino-encino	20	0.23	0.17	11.5	8	3.23	30	35	0.50	0.03	9.50	0.03	88	0.07	2.75	79.40	0.0001	0.0008	0.25	0.06	0.004
Pino-encino	20	0.60	0.24	20.0	9	2.50	28	35	0.24	0.04	26.66	0.01	61	0.43	16.87	487.58	0.0004	0.0048	0.59	0.35	0.003
Pino-encino	20	0.70	0.14	35.0	8	1.93	38	35	1.33	0.21	231.57	0.19	55	0.66	26.31	760.43	0.0007	0.0075	0.79	0.55	0.009
Pino-encino	0	0.42	0.14	21.0	8	2.73	23	25	0.30	0.10	26.38	0.07	93	0.60	23.64	683.27	0.0006	0.0067	0.66	0.28	0.004
Pino-oyamel	0	0.78	0.42	10.4	13.2	2.08	26	16	0.49	0.17	54.68	0.16	77	0.71	28.35	819.23	0.0008	0.0081	0.42	0.33	0.030
Pino-oyamel	20	0.74	0.46	7.4	16	2.85	30	35	0.71	0.20	61.30	0.21	76	0.55	21.96	634.56	0.0006	0.0063	0.35	0.26	0.025
Pino-oyamel	20	0.33	0.15	6.6	11	1.70	30	35	2.18	0.26	121.80	0.15	43	0.35	14.07	406.63	0.0004	0.0040	0.50	0.16	0.016
Pino-oyamel	20	0.61	0.34	6.1	16	3.44	33	35	1.14	0.23	95.70	0.25	60	0.26	10.32	298.26	0.0003	0.0029	0.44	0.27	0.000
Pino-oyamel	20	1.14	0.60	7.6	21	2.30	19	35	1.04	0.39	174.75	0.37	77	1.12	44.49	1285.77	0.0012	0.0127	0.45	0.52	0.023
Pino-oyamel	20	0.74	0.14	14.8	11	3.10	31	35	0.83	0.17	154.00	0.18	73	1.26	50.00	1445.09	0.0013	0.0142	0.79	0.58	0.019
Pino-oyamel	10	0.27	0.08	2.7	16	0.89	37	55	0.28	0.13	16.44	0.11	96	0.38	15.16	438.20	0.0004	0.0043	0.65	0.18	0.014
Pino-oyamel	10	0.27	0.11	5.4	11	1.74	31	55	0.39	0.18	19.41	0.16	96	0.34	13.63	393.80	0.0004	0.0039	0.56	0.15	0.012

Pino-oyamel	10	0.34	0.13	3.4	16	1.74	30	55	0.75	0.14	49.81	0.13	71	0.46	18.32	529.45	0.0005	0.0052	0.59	0.20	0.012
Pino-oyamel	10	0.34	0.10	3.4	16	2.07	35	55	0.35	0.16	26.48	0.14	90	0.48	19.17	554.02	0.0005	0.0055	0.66	0.22	0.019
Pino-oyamel	10	0.37	0.11	3.7	16	0.37	31	55	0.43	0.19	34.08	0.20	95	0.54	21.59	623.90	0.0006	0.0062	0.64	0.24	0.018
Pino-oyamel	10	0.37	0.10	4.9	13.5	1.47	32	55	0.57	0.23	47.85	0.22	89	0.53	20.98	606.22	0.0006	0.0060	0.66	0.24	0.026
Pino-oyamel	0	0.55	0.24	11.0	11	1.66	26	25	0.59	0.15	56.28	0.14	87	0.57	22.52	650.88	0.0006	0.0064	0.54	0.30	0.015
Pino-oyamel	0	0.69	0.35	6.9	16	1.30	29	16	0.47	0.15	49.62	0.16	80	0.66	26.09	753.86	0.0007	0.0074	0.44	0.30	0.037
Pino-oyamel	0	0.25	0.14	12.5	8	1.53	25	16	0.31	0.05	10.63	0.05	80	0.20	7.82	225.93	0.0002	0.0022	0.36	0.09	0.019
Pino-oyamel	0	0.44	0.10	14.6	9	1.66	26	25	0.18	0.07	19.17	0.06	86	0.72	28.58	825.94	0.0008	0.0081	0.76	0.33	0.008
Pino-oyamel	0	0.26	0.07	13.0	8	1.96	24	25	0.36	0.08	21.45	0.08	92	0.11	4.50	130.01	0.0001	0.0013	0.72	0.19	0.004