



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS
FORESTALES**

**CARACTERIZACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES FORESTALES AÉREOS Y
COMPORTAMIENTO POTENCIAL DEL FUEGO EN UNA PLANTACIÓN DE
Callitropsis lusitanica (Mill.) D.P.Little**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

PRESENTA:

JORGE ALEJANDRO AGUILAR HERRERA

Bajo la supervisión de:

DR. DANTE ARTURO RODRÍGUEZ TREJO



APROBADA



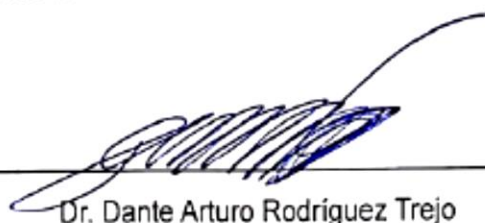
Chapingo, Estado de México, diciembre de 2023

**CARACTERIZACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES FORESTALES AÉREOS Y
COMPORTAMIENTO POTENCIAL DEL FUEGO EN UNA PLANTACIÓN DE
*Callitropsis lusitanica***

Tesis realizada por **JORGE ALEJANDRO AGUILAR HERRERA** bajo la supervisión del
Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para
obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

DIRECTOR:



Dr. Dante Arturo Rodríguez Trejo

ASESOR:



M.C. Ma. Amparo Máxima Borja de la Rosa

ASESOR:



Dr. Alejandro Corona Ambriz

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	v
LISTA DE FIGURAS	v
RECONOCIMIENTO	vi
DEDICATORIA	vii
AGRADECIMIENTO	viii
DATOS BIBLIOGRÁFICOS	ix
RESUMEN GENERAL	x
ABSTRACT xi	
CAPÍTULO I. Introducción general	1
1.1 Incendios y la vulnerabilidad de los ecosistemas	2
1.2 Investigaciones a escala local: Campo Experimental Las Cruces en Texcoco y Tequexquináhuac en el Estado de México	3
1.3. Hipótesis.....	4
1.4. Objetivos	4
Capítulo II. Revisión Bibliográfica.....	7
2.1. Ecología del fuego y comportamiento de incendios forestales	7
2.2. Combustibles forestales aéreos y vulnerabilidad de las plantaciones.....	12
2.3. Cambio climático y aumento de la incidencia de incendios	13
2.4. Investigaciones locales relevantes	15
2.5. Enfoques para la evaluación de riesgos de incendios	16
2.6. Influencia de las condiciones climáticas en el comportamiento del fuego	17
Literatura consultada	18
Capítulo III Estimación de cargas de combustibles forestales aéreos en una plantación de <i>Callitropsis lusitanica</i> (Mill) D.P. Little	22
Resumen	22

Abstract	23
Introducción	23
Materiales y métodos	25
3.1. Descripción del área de estudio	25
3.2. Muestreo	25
3.2.1. Propuesta de metodología del “Árbol ideal”	26
3.2.2. Metodología de BeHave Plus	30
Resultados	30
3.3. Modelación de los combustibles aéreos del cedro blanco.	30
3.4. Validación del modelo de regresión	34
3.5. Modelo árbol ideal	38
3.6. Cargas de combustibles aéreos	40
3.7. Simulaciones de la intensidad crítica	41
Discusión	43
Conclusión	44
Literatura consultada	45
Capítulo IV. Conclusiones Generales	50

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Coeficientes de regresión para los modelos de regresión lineal simple entre la longitud de la rama y las variables de respuesta	31
Cuadro 2. Coeficientes de modelos de regresión lineal múltiple para predecir peso seco de ramas	38
Cuadro 3. Simulación de Intensidad de Incendios utilizando Behave Plus	42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio: Las Cruces y Tequexquináhuac	25
Figura 2. Perfil vertical de los combustibles forestales aéreos.....	28
Figura 3. Relación entre la longitud de la rama y el peso seco total de la rama	32
Figura 4. Relación entre la longitud de la rama y el peso seco de la rama viva.....	32
Figura 5. Relación entre la longitud de la rama y el peso seco de las ramillas muertas	33
Figura 6. Relación entre la longitud de la rama y el peso seco de la biomasa.....	33
Figura 7. Gráfico de residuos contra valores ajustados del PST ~LR.....	34
Figura 8. Gráfico de residuos contra valores ajustados del PSRV ~LR.....	35
Figura 9. Gráfico de los residuos contra valores ajustados PSRM~LR.....	36
Figura 10. Gráfico de los residuos contra valores ajustados PSH~LR.....	37

RECONOCIMIENTO

Quiero expresar mi profundo agradecimiento por el valioso apoyo y respaldo recibido durante el desarrollo y conclusión de mi investigación y mis estudios de posgrado.

En primer lugar, quiero reconocer y agradecer al Programa de Becas Nacionales de CONAHCyT 2021-2023 por brindarme la oportunidad de continuar mi formación académica. Su generosidad ha sido fundamental para alcanzar mis metas y avanzar en mi carrera profesional.

Asimismo, deseo expresar mi agradecimiento al Programa de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales 2021-2023 de la Universidad Autónoma Chapingo. A través de su rigor académico y excelencia, he adquirido conocimientos especializados y habilidades clave en mi área de estudio. Su compromiso con la formación de profesionales altamente calificados es digno de reconocimiento.

Por último, quiero manifestar mi gratitud a la Dirección General de Investigación y Posgrado de la Universidad Autónoma Chapingo. Su compromiso con la investigación de calidad y la promoción del avance científico ha sido una fuente de inspiración para mí.

Gracias a su apoyo, he tenido la oportunidad de participar en proyectos de investigación emocionantes y enriquecedores, ampliando mi visión y contribuyendo al campo del conocimiento.

DEDICATORIA

A mis queridos padres, Ma. Elena Herrera Zavala y Rafael Aguilar Negrete, quienes desde mi niñez me enseñaron a amar y respetar la naturaleza. Su apoyo incondicional, sus sabios consejos y su ejemplo de perseverancia han sido fundamentales en mi vida. Sin su constante aliento, no habría alcanzado este logro.

A mis hermanos, María Magdalena Aguilar Herrera y Juan Rafael Aguilar Herrera, siempre presentes en cada etapa de mi vida, brindándome su amor y comprensión. Su paciencia y comprensión durante los momentos más desafiantes, y la celebración de mis logros como si fueran suyos, son invaluableles.

A mis amigos, mi refugio y fuente de alegría en los momentos más intensos de este viaje. Su apoyo constante, sus palabras de aliento y los momentos inolvidables que hemos compartido significan mucho para mí. Valoraré siempre su amistad sincera y su presencia en mi vida.

Y finalmente, a la vida misma, por brindarme la oportunidad de emprender este proyecto de investigación en el campo de las ciencias forestales. He tenido el privilegio de ser testigo de la belleza y diversidad que nos ofrece la naturaleza, así como de la importancia de su conservación. Esta tesis es mi contribución hacia un futuro sostenible, un reflejo de mi gratitud por todo lo que la vida me ha dado.

Gracias a todos por ser parte de este logro.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Universidad Autónoma Chapingo por otorgarme la invaluable oportunidad de cursar el posgrado. Esta institución me ha brindado un ambiente académico excepcional y ha sido fundamental en mi crecimiento profesional.

Me gustaría agradecer especialmente al Dr. Dante Arturo Rodríguez Trejo por su disposición, paciencia y apoyo incondicional para la realización de este proyecto de investigación. Su guía experta y constante motivación han sido fundamentales en mi desarrollo como investigador.

También quiero expresar mi gratitud a la Dra. Amparo Borja de la Rosa y al Dr. Alejandro Corona Ambriz por formar parte del comité revisor de mi trabajo y por sus acertadas y oportunas observaciones. Sus conocimientos y experiencia han enriquecido mi estudio.

No puedo dejar de agradecer a todos los profesores que han compartido sus conocimientos conmigo durante mi formación académica. Su experiencia y calidad humana han sido inspiradoras y han dejado una huella imborrable en mi educación.

Por último, pero no menos importante, quiero agradecer a mis compañeros de clase y profesionales excepcionales. Su apoyo, colaboración y amistad han hecho del proceso de aprendizaje una experiencia enriquecedora y motivadora.

Estoy enormemente agradecido a todas las personas e instituciones mencionadas por su contribución y apoyo en mi formación. Sus enseñanzas y mentoría han sido fundamentales en mi camino hacia el éxito y siempre serán recordadas con gratitud.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Jorge Alejandro Aguilar Herrera.

Fecha de nacimiento: 12 de febrero de 1994.

Lugar de Nacimiento: San Luis Potosí.

CURP: AUHJ940212HSPGRR07

Profesión: Ingeniero Forestal.

Cédula profesional: 12860009.



Desarrollo académico

Secundaria: Secundaria Técnica Número 26, Villa de Arriaga, San Luis Potosí (2006-2009).

Preparatoria: Preparatoria Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo (2009-2012).

Licenciatura: Universidad Autónoma Chapingo (2012-2016).

Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo (2021-2023).

RESUMEN GENERAL

CARACTERIZACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES FORESTALES AÉREOS Y COMPORTAMIENTO POTENCIAL DEL FUEGO EN UNA PLANTACIÓN DE *Callitropsis lusitanica* (MILL.) D.P.LITTLE

La cantidad de biomasa en las copas arbóreas es un factor clave en la propagación de incendios forestales. El objetivo de este estudio fue estimar las cargas de combustibles aéreos en la barranca situada entre el Campo Forestal Experimental las Cruces y Tequexquináhuac, México, para contribuir a la prevención de incendios. Se realizaron mediciones de biomasa foliar, de ramas vivas y muertas en parcelas de muestreo. Se desarrollaron modelos de regresión para predecir el peso seco a partir de variables morfológicas como longitud de ramas y diámetro de copa. También se simularon escenarios de ignición considerando contenido de humedad foliar y grosor de corteza. Se encontró alta variabilidad en la carga de combustibles entre sitios, con valores de 121 y 42 ton/ha. Los resultados proveen estimaciones cuantitativas útiles para la gestión local del riesgo de incendios. Se recomienda complementar con mediciones periódicas in situ para mapear la heterogeneidad espacial en el combustible forestal aéreo.

Palabras clave: Biomasa arbórea, Evaluación de riesgos, Estrategias de prevención, Variables morfológicas, Simulaciones de ignición.

Tesis de Maestría en Ciencias, en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo,

Autor: Jorge Alejandro Aguilar Herrera

Director de Tesis: Dante Arturo Rodríguez Trejo

ABSTRACT

CHARACTERIZATION OF AERIAL FOREST FUELS AND POTENTIAL FIRE BEHAVIOR IN A PLANTATION OF *Callitropsis lusitanica* (MILL.) D.P.LITTLE

The amount of biomass in tree canopies is a key factor in the spread of forest fires. To contribute to fire prevention, this study aimed to estimate aerial fuel loads in the ravine between the Las Cruces Experimental Forest Field and Tequexquináhuac, Mexico. Measurements of foliar biomass, and live and dead branches were taken in sample plots. Regression models were developed to predict dry weight based on morphological variables such as branch length and crown diameter. Ignition scenarios were also simulated considering foliar moisture content and bark thickness. High variability in fuel loads was found between sites, with values ranging from 121 to 42 tons/ha. The results offer useful quantitative estimates for local fire risk management. Complementing them with periodic on-site measurements to map spatial heterogeneity in aerial forest fuel is recommended.

Keywords: Biomass assessment, Risk evaluation, Prevention management, Morphological variables, Ignition simulations.

Tesis de Maestría en Ciencias, en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo,

Autor: Jorge Alejandro Aguilar Herrera

Director de Tesis: Dante Arturo Rodríguez Trejo

CAPÍTULO I. Introducción general

Los incendios forestales constituyen una amenaza persistente y en aumento para los ecosistemas forestales a nivel global. En las últimas décadas, se ha evidenciado un incremento tanto en la frecuencia como en la intensidad de estos eventos, fenómeno ampliamente atribuido al cambio climático y a prácticas inapropiadas de manejo forestal (Flannigan et al., 2009; IPCC, 2014).

El cambio climático, resultado de actividades humanas, ha provocado un aumento en las temperaturas globales, alteraciones en los patrones de lluvia y nieve, y cambios en las comunidades de plantas. Estos factores han elevado significativamente la probabilidad de incendios, los cuales ahora son más intensos y extensos que en épocas pasadas (Westerling et al., 2006). Además, la pérdida de bosques no solo agrega presión al cambio climático, al reducir la capacidad de captura de carbono, sino que también intensifica la absorción de calor terrestre (IPCC, 2014).

Las prácticas inadecuadas de manejo forestal, como la acumulación de grandes cantidades de vegetación que sirven de combustible, así como la construcción de infraestructuras en áreas de riesgo, contribuyen a la vulnerabilidad de los bosques a los incendios (Bowman et al., 2009).

Especialmente, las plantaciones forestales se presentan como ecosistemas extremadamente susceptibles a los incendios de copas o incendios de dosel, fenómenos donde el fuego se propaga velozmente de árbol a árbol a través de las copas, llevando a la pérdida rápida de grandes áreas boscosas (Cruz et al., 2008).

Para abordar eficazmente los incendios en plantaciones forestales, resulta fundamental caracterizar y cuantificar los combustibles forestales aéreos presentes en el dosel. Estos combustibles, comprendiendo la biomasa viva y muerta en las copas de los árboles, incluyendo hojas, ramas y corteza, pueden desempeñar un papel crítico en la propagación de los incendios de copas (Alexander & Cruz, 2012).

La caracterización y cuantificación de estos combustibles aéreos implica medir su cantidad, distribución, composición y estructura, información crucial para comprender los patrones y las razones detrás de la propagación de los incendios de copas, y para desarrollar estrategias efectivas de manejo del fuego (Van Wagner, 1977).

1.1 Incendios y la vulnerabilidad de los ecosistemas

Los incendios forestales constituyen una amenaza significativa para la integridad y la supervivencia de los ecosistemas a nivel mundial. Ya sean desencadenados por factores naturales o actividades humanas, estos eventos tienen el potencial de alterar drásticamente los ecosistemas, provocando la pérdida de biodiversidad (Stephens et al., 2013).

Los ecosistemas boscosos, en particular, se revelan como altamente vulnerables a los incendios forestales. Estos eventos pueden devastar vastas áreas boscosas, desequilibrar la ecología local y afectar la fauna y flora (Keeley et al., 2009). Además, los incendios forestales impactan significativamente en los recursos de aire, agua y suelo, así como en los bienes y servicios ecosistémicos (Flannigan et al., 2013).

El cambio climático exacerba esta amenaza, ya que las condiciones más cálidas y secas aumentan la frecuencia e intensidad de los incendios forestales. Se estima que, para 2050, los incendios forestales podrían aumentar en un 30%, y para fin de siglo, en un 50%, debido al cambio climático (Moritz et al., 2012).

Estos incendios no solo representan una amenaza a nivel local sino que, según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), generan hasta un tercio de las emisiones de carbono de los ecosistemas globales, agravando aún más el cambio climático (Williams et al., 2013).

Es imperativo, por lo tanto, desarrollar e implementar estrategias efectivas para prevenir y gestionar los incendios forestales. Esto incluye la promoción de prácticas

de manejo forestal sostenible, la protección de áreas de alto valor ecológico y la restauración de áreas afectadas por incendios (Fernández & Botelho, 2003).

1.2 Investigaciones a escala local: Campo Experimental Las Cruces en Texcoco y Tequexquináhuac en el Estado de México

A nivel local, se han llevado a cabo investigaciones significativas sobre los incendios forestales en el Campo Experimental Las Cruces en Texcoco y en Tequexquináhuac, Estado de México (Vargas-Pérez et al., 2017).

El Campo Experimental Las Cruces, emplazado en Texcoco, ha sido escenario de diversas investigaciones sobre la vulnerabilidad al fuego en áreas forestales (Vargas-Pérez et al., 2018). Estos estudios, utilizando el método multicriterio PROMETHEE II, han considerado indicadores cruciales para la incidencia de incendios. La información se obtuvo de registros en campo, bases de datos, cartografía y entrevistas a expertos en incendios. Como resultado, se identificaron sitios con alta, media y baja susceptibilidad a incendios, destacándose criterios como temperatura máxima anual, prevención de incendios, carga de combustible y distancia a vías de acceso.

Tequexquináhuac, en el municipio de Texcoco, es un núcleo urbano con más de 6,000 habitantes. Aunque no existen investigaciones específicas sobre incendios forestales en Tequexquináhuac, es esencial destacar que la región comparte condiciones climáticas y ambientales con el Campo Experimental Las Cruces. Por lo tanto, los hallazgos de las investigaciones realizadas en Las Cruces probablemente sean aplicables a Tequexquináhuac.

Estas investigaciones locales se suman a una vasta literatura científica sobre incendios forestales a nivel global. Estudios como los de Bowman et al., Flannigan et al., y el IPCC abordan la complejidad de los incendios en el sistema terrestre, su relación con el cambio climático, y las proyecciones futuras. Además, investigaciones específicas, como las de Vargas-Pérez et al., destacan la susceptibilidad a incendios en contextos locales específicos.

Este trabajo busca integrar la literatura científica existente, abordando la problemática de los incendios forestales desde una perspectiva local y global. La información recopilada se utilizará para caracterizar y comprender la vulnerabilidad de las plantaciones de cedro blanco a los incendios de copa, proveyendo así una base sólida para estrategias efectivas de prevención y manejo en estas áreas específicas.

1.3. Hipótesis

La hipótesis principal es que la plantación de *C. lusitanica* en el Campo Experimental Las Cruces presenta una alta carga de combustibles finos en los combustibles aéreos para generar condiciones propicias para la ignición y propagación de incendios de copas bajo ciertos escenarios climáticos.

1.4. Objetivos

Objetivo general

Caracterizar los combustibles del dosel en la plantación de *C. lusitanica*, considerando las principales variables relacionadas con el inicio y la propagación del fuego de copas.

Objetivos específicos

- Estimar las cargas de combustibles aéreos.
- Obtener otras variables estructurales de combustibles aéreos, como altura de copas, densidad de copa, distancia entre copas y contenido de humedad foliar.
- Estimar la intensidad crítica del incendio superficial para producir un incendio de copas.

- Evaluar el comportamiento potencial de incendios de copa bajo diferentes escenarios de tiempo atmosférico, pendiente y combustibles, utilizando el programa Behave Plus.

En la intersección entre la ecología forestal y la gestión del fuego, emerge la necesidad crítica de comprender la dinámica de los combustibles forestales aéreos y el comportamiento potencial del fuego. En este contexto, la presente investigación se sumerge en la caracterización de una plantación de *Callitropsis lusitanica*, buscando alternativas de mejoras de los combustibles del dosel y sus implicaciones en la propagación de incendios de copas.

El incansable avance de los incendios forestales y su amenaza constante a la integridad de nuestros ecosistemas exige una mirada profunda y meticulosa. Esta tesis, concebida como parte integral de la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias Forestales, se posiciona en el epicentro de esta problemática global.

El primer capítulo introduce en la complejidad de los incendios forestales, destacando la vulnerabilidad de los ecosistemas y abordando investigaciones locales, especialmente en el Campo Experimental Las Cruces y áreas circundantes en Texcoco y Tequexquináhuac, Estado de México. Se establecen hipótesis sólidas y objetivos específicos que marcan la senda hacia la comprensión y gestión efectiva de los incendios forestales.

La revisión bibliográfica, segundo capítulo, se erige como un bastión de conocimiento, explorando desde la ecología del fuego hasta la influencia de las condiciones climáticas en el comportamiento del fuego. Este capítulo no solo cimenta las bases teóricas de la investigación sino que también teje conexiones fundamentales entre diferentes disciplinas, proporcionando una panorámica completa.

El tercer capítulo, una inmersión en la estimación de cargas de combustibles forestales aéreos, ofrece una perspectiva práctica y aplicada. Desde la descripción del área de estudio hasta la metodología del "Árbol Ideal" y el empleo de Behave

Plus, cada paso revela detalles cruciales para entender la complejidad de los combustibles aéreos.

Finalmente, el cuarto capítulo amalgama todas las piezas del rompecabezas en conclusiones generales. Aquí, se destila el conocimiento adquirido y se proyectan las posibles aplicaciones en la gestión del fuego forestal y más allá.

Los resultados permitirán comprobar la hipótesis planteada y determinar el riesgo real de incendios de copas en la plantación, para así desarrollar estrategias que disminuyan su vulnerabilidad.

Capítulo II. Revisión Bibliográfica

2.1. Ecología del fuego y comportamiento de incendios forestales

Los incendios forestales, un fenómeno desde la historia antigua de los ecosistemas terrestres, han experimentado cambios preocupantes en frecuencia e intensidad en las últimas décadas.

Este cambio, ampliamente documentado en importantes estudios (Bowman et al., 2009; Westerling et al., 2006), ha llevado a la continua degradación de los ecosistemas forestales y a la pérdida de biodiversidad, convirtiéndose en un problema global urgente. Desde una perspectiva física, el fuego se caracteriza por la liberación de calor y luz en forma de llama que se produce cuando una fuente de combustible coincide con un evento de combustión, ya sea causado por el hombre o natural. Cuando ataca más de una hectárea de bosque o matorral, se denomina incendio forestal (Colin et al. 2001).

El término comportamiento del fuego se utiliza para describir cómo se enciende el combustible, se desarrollan las llamas y se propaga el fuego (Brown y Davis, 1973; Chandler et al., 1983; Albini, 1984; Merrill y Alexander, 1987; Pine y Andrews, 1996).

Este comportamiento está influenciado por la interacción de los combustibles forestales con la meteorología y la topografía. La disciplina de la ecología del fuego arroja luz sobre la comprensión del papel transformador del fuego en los ecosistemas terrestres (Whelan, 1995). Reconociendo su dualidad destructiva y regenerativa, el fuego parece ser un factor importante en la dinámica y evolución de los ecosistemas (Jardel et al., 2009).

Los incendios forestales, fenómenos multifacéticos, surgen de la compleja interacción de factores físicos, químicos y biológicos. El comportamiento del fuego, según señala Rothermel (1972), está intrínsecamente ligado a las características de los combustibles vegetales, las condiciones climáticas y topográficas, y la ignición inicial.

Los combustibles forestales son una mezcla diversa de partículas vegetales, formando un conjunto heterogéneo de combustibles en términos de tamaño, composición y disposición (Keane et al., 2015). Los árboles acumulan hojas caídas y restos de madera en la superficie del suelo, un proceso influenciado por factores como el viento, la poda natural y las prácticas silvícolas. Bajo los árboles, crece la vegetación del sotobosque, que incluye especies leñosas, gramíneas y otras plantas herbáceas. Estos elementos constituyen los combustibles de superficie, definidos como aquellos cuya biomasa alcanza una altura máxima de 2 m desde la superficie del mantillo (Lutes et al., 2009; Keane, 2013).

El término dosel arbóreo se refiere al espacio por encima del suelo ocupado por las copas de los árboles (Mercker, 2017). Se utilizará para describir los combustibles forestales aéreos a nivel de árbol, mientras que el dosel arbóreo se refiere a nivel del espacio (Cruz et al., 2003). Los componentes principales de los combustibles del dosel arbóreo son las agujas y las ramitas finas (diámetro < 6 mm), y a veces también parte de las ramas (diámetro 6-25 mm).

Desde la perspectiva de la capa de combustible involucrada en la propagación del fuego, se pueden distinguir tres tipos de incendios forestales: subterráneos, de superficie y de copas o dosel arbóreo (Brown y Davies, 1973; Chandler et al., 1983; Pyne y Andrews, 1996). Los incendios subterráneos implican una combustión latente de materia orgánica descompuesta bajo la hojarasca fresca y ocurren en suelos orgánicos o turbosos. Los incendios de superficie se propagan por hojarasca, restos leñosos caídos o vegetación del sotobosque. Los incendios de copas ascienden desde los combustibles de superficie hasta el dosel arbóreo y se clasifican como pasivos, activos o independientes según su comportamiento.

La intensificación de los incendios forestales no es simplemente una manifestación natural; está estrechamente vinculada a las actividades humanas y al cambio climático. Esta conexión, destacada por Flannigan et al. (2009), subraya la necesidad crítica de comprender y abordar las complejas interacciones que han llevado a este aumento en la frecuencia e intensidad de los incendios.

En este contexto, el cambio climático emerge como uno de los principales catalizadores del incremento de los incendios forestales. Investigaciones recientes, como las de Flannigan et al. (2009), destacan los impactos del cambio climático en la actividad y gestión de incendios en el bosque circumboreal. Los cambios en las condiciones climáticas, como temperaturas más cálidas y patrones climáticos alterados, han contribuido directamente al aumento de la actividad de incendios forestales.

Además del cambio climático, la actividad humana ha desempeñado un papel crucial en la escalada de los incendios forestales. La expansión urbana, la gestión inadecuada del terreno y la supresión de incendios naturales han alterado significativamente los patrones históricos de incendios (Westerling et al., 2006). El fuego, en su forma natural esencial para la salud de los ecosistemas, se ha convertido en una amenaza debido a la interferencia humana, subrayando la imperante necesidad de abordar la relación entre las comunidades humanas y los ecosistemas forestales.

El aumento en la frecuencia e intensidad de los incendios forestales no solo afecta la estructura y composición de los ecosistemas, sino que también tiene consecuencias directas sobre la biodiversidad. Investigaciones como las de Bowman et al. (2009) han documentado la pérdida significativa de especies y hábitats debido a los incendios forestales, subrayando la interconexión crítica entre la salud de los bosques y la diversidad biológica. La urgencia de conservar la biodiversidad y preservar los servicios ecosistémicos se convierte en un componente vital en la gestión de incendios forestales.

La severidad del fuego se define como el grado de cambio ambiental causado por el fuego (Keeley, 2009). Refleja los impactos o el nivel de daño a componentes del ecosistema como el arbolado, vegetación de sotobosque o suelo (Keeley, 2008). En bosques, la severidad se expresa a menudo en términos de mortalidad del arbolado, pérdida del dosel arbóreo, soflamados de copa o chamuscados de tronco. La severidad en el arbolado refleja el impacto sufrido por este como resultado del

fuego, y la mortalidad post-incendio es un indicador comúnmente utilizado para evaluarla (Whittier y Gray, 2016).

Desde la contribución fundamental de Rothermel (1972), la investigación ha avanzado hacia nuevas fronteras tecnológicas y de modelado. La aplicación de tecnologías de teledetección y modelos de simulación de incendios ha revolucionado la forma en que abordamos la estimación de cargas de combustibles aéreos. El modelo original de Rothermel sentó las bases, pero las herramientas contemporáneas permiten una comprensión más precisa y detallada (Rothermel, 1972).

La teledetección, como se evidencia en estudios como el de Hudak et al. (2016), ha emergido como una metodología poderosa para estimar las cargas de combustibles aéreos a gran escala. La capacidad de utilizar datos de sensores remotos, como satélites, ha mejorado significativamente la eficiencia en la obtención de información sobre las condiciones del dosel forestal y ha proporcionado estimaciones más rápidas y menos laboriosas (Hudak et al., 2016).

Además, los modelos de simulación de incendios, como FIREMON (Lutes et al., 2009), han evolucionado para proporcionar una representación más precisa y dinámica del comportamiento del fuego en diversos ecosistemas. Estos modelos permiten simular escenarios específicos, teniendo en cuenta factores climáticos, topografía y tipos de combustibles, lo que ha mejorado significativamente la capacidad predictiva y la comprensión de la variabilidad espacial y temporal de los incendios (Lutes et al., 2009).

A pesar de estos avances, persisten desafíos significativos en la estimación precisa de las cargas de combustibles aéreos. La recolección de datos in situ, aunque proporciona información detallada, sigue siendo laboriosa y limitada en términos de escala. Los modelos de simulación de incendios, aunque avanzados, dependen en gran medida de la calidad y precisión de los datos de entrada, y la teledetección, aunque eficiente, enfrenta desafíos relacionados con la resolución espacial y la complejidad del dosel forestal.

Las brechas en la literatura, como se destacó en la revisión bibliográfica, proporcionan oportunidades cruciales para futuras investigaciones. La caracterización de combustibles forestales en áreas específicas ha sido exhaustiva, pero se necesita un enfoque más integral que abarque una variedad de ecosistemas y condiciones. Además, el desarrollo y prueba de nuevas metodologías para estimar cargas de combustibles aéreos sigue siendo una dirección prometedora para superar las limitaciones existentes.

Las variables que determinan el comportamiento del fuego incluyen la carga de combustibles, su contenido de humedad, el viento, la pendiente del terreno, entre otros. A su vez, estas variables se ven afectadas por el clima, la fenología y estructura de la vegetación (Andrews et al., 2005).

En México, Rodríguez-Trejo y Fulé (2003) proponen un manejo ecológico del fuego en bosques de pino-encino, considerando la historia natural de incendios y los efectos regenerativos del fuego de baja intensidad. Estudios específicos analizan la dinámica del fuego en relación con la estructura del dosel arbóreo (Rodríguez-Trejo et al., 2010).

La revisión bibliográfica trazada ofrece una visión panorámica de la compleja red de factores que influyen en la dinámica de los incendios forestales. Desde la perspectiva histórica de Pyne (1982) hasta los avances contemporáneos en teledetección y modelos de simulación, se evidencia la evolución del conocimiento en este campo crucial. Sin embargo, las brechas identificadas indican la necesidad de investigaciones futuras que aborden de manera integral las complejidades de los incendios forestales y sus implicaciones para la biodiversidad y la salud de los ecosistemas.

2.2. Combustibles forestales aéreos y vulnerabilidad de las plantaciones

Los combustibles forestales aéreos, compuestos por la variada biomasa en las copas de los árboles, desde hojas hasta ramillas y corteza, desempeñan un papel crítico en la dinámica de los incendios de copas (Cruz et al., 2003; Van Wagner, 1977). La singularidad de las plantaciones forestales, con su alta densidad y la disposición horizontal y vertical continua de las copas, las hace especialmente propensas a los incendios de copas (Agee y Skinner, 2005).

La carga de combustibles aéreos, su distribución y contenido de humedad son factores clave que determinan la facilidad de ignición y la combustibilidad. Dosel denso, copas entrelazadas y una alta carga de material fino crean un entorno propicio para la propagación del fuego entre las copas (Cruz et al., 2003; Xanthopoulos, 2007).

La gestión adecuada de los combustibles aéreos mediante prácticas como poda, raleo y eliminación de material muerto resulta esencial para mitigar el riesgo de incendios de copas en plantaciones forestales (Fernandes y Botelho, 2003). Además, la elección cuidadosa de especies, el diseño de plantaciones y las prácticas silvícolas contribuyen a minimizar la vulnerabilidad de estas áreas (Rodríguez Trejo, 2008).

En el caso específico de *Callitropsis lusitanica*, conocida como cedro blanco, su relación única con el fuego destaca aspectos interesantes (Chávez Durán et al., 2016). Aunque la investigación específica sobre esta especie es limitada, se sabe que algunos cipreses, en general, tienen adaptaciones al fuego, como la capacidad de rebrote post-incendios y la serotinia, donde las semillas requieren el calor del fuego para germinar. Estas adaptaciones subrayan la complejidad de la interacción entre la especie y el fuego, resaltando la importancia de comprender las características biológicas que influyen en la vulnerabilidad de las especies a los incendios (Hudak et al., 2016).

Aunque la investigación específica sobre la vulnerabilidad del cedro blanco es limitada, estudios en áreas con presencia significativa de esta especie indican su susceptibilidad a los incendios debido a la alta carga de combustible y contenido de humedad (Hudak et al., 2016). La identificación precisa de los factores que contribuyen a la vulnerabilidad del cedro blanco se convierte en un elemento clave para desarrollar estrategias de gestión y conservación efectivas. La amalgama de estos conocimientos contribuirá a fortalecer las bases para una gestión forestal más resiliente y sostenible ante los desafíos actuales de incendios forestales.

2.3. Cambio climático y aumento de la incidencia de incendios

El intrincado entre el cambio climático y la proliferación de incendios forestales se manifiesta como un tema cardinal en la narrativa ambiental contemporánea. La erudición científica, expresada a través de investigaciones clave, desvela la profundidad de esta conexión simbiótica, subrayando la urgencia de una comprensión exhaustiva y una acción estratégica.

Las investigaciones, encabezadas por Flannigan et al. (2009) y respaldadas por el consenso del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2014), delinean cómo el cambio climático no solo es un mero espectador de los incendios forestales, sino un agente activo que amplifica su frecuencia e intensidad. La elevación de las temperaturas, las prolongadas sequías y los eventos climáticos extremos actúan en sinfonía, creando un escenario propicio para la propagación descontrolada del fuego.

En una proyección sombría, Moritz et al. (2012) advierten que la incidencia de incendios forestales podría experimentar un aumento alarmante del 30 al 50% para fines de siglo debido al cambio climático antropogénico. Esta predicción va más allá de una especulación; es una advertencia crítica que exige una reconsideración inmediata de las estrategias de gestión ambiental.

El vínculo intrincado entre los incendios forestales y el cambio climático se intensifica cuando consideramos el papel del fuego como emisor de CO₂. La

combustión de la biomasa forestal intensifica la liberación de dióxido de carbono hacia la atmósfera, contribuyendo de manera significativa al calentamiento global y acentuando la aridez del entorno (Running, 2008). Este ciclo vicioso, donde el fuego y el cambio climático se alimentan mutuamente, plantea un desafío monumental para la estabilidad climática y la salud de nuestros ecosistemas.

En respuesta a esta crisis, la literatura especializada resalta la necesidad inminente de estrategias holísticas. El manejo forestal sostenible, propuesto por Fernandes y Botelho (2003), surge como un pilar fundamental en la construcción de la resiliencia de los ecosistemas frente a la embestida de los incendios. La conservación de bosques, no solo como sumideros cruciales de carbono sino como guardianes de la biodiversidad, se vuelve una misión crucial en este contexto.

Las tácticas de adaptación y mitigación de incendios, según Fernandes y Botelho (2003) y Stephens et al. (2013), emergen como estrategias ineludibles en esta batalla contra las llamas. La resiliencia de los ecosistemas no es un mero anhelo; es una necesidad imperante. Para lograrla, las prácticas silvícolas desempeñan un papel central. Emular regímenes históricos de incendios, reducir combustibles y fomentar la heterogeneidad del paisaje son estrategias clave propuestas por Agee y Skinner (2005). Estas prácticas no solo buscan revertir los daños causados por incendios pasados, sino también forjar un futuro donde la coexistencia con el fuego sea más armoniosa.

Sin embargo, la implementación exitosa de estas estrategias requiere más que acciones aisladas. La colaboración entre diversos actores, desde científicos y gestores ambientales hasta comunidades locales, se presenta como un elemento clave. La sinfonía de la prevención y el manejo del fuego requiere una armonización de esfuerzos y la fusión de conocimientos diversos.

El cambio climático y la creciente incidencia de incendios forestales forman un dúo disonante que amenaza la salud de nuestros ecosistemas. Ante esta sinfonía amenazante, la literatura científica nos insta a actuar con determinación y sabiduría. El futuro de nuestros bosques, entrelazado con el de la humanidad, depende de

nuestra capacidad para adaptarnos, mitigar y, sobre todo, colaborar en la búsqueda de soluciones que resguarden la vitalidad de nuestro planeta.

2.4. Investigaciones locales relevantes

En el microcosmos de la investigación local, se erigen estudios cruciales que arrojan luz sobre la vulnerabilidad a los incendios forestales en entornos específicos. Entre estas contribuciones, el trabajo de Vargas-Pérez et al. (2017, 2018) destaca al analizar de manera exhaustiva la vulnerabilidad del Campo Experimental Las Cruces. Este análisis se sumerge en las complejidades de las variables ambientales y de manejo que influyen en el riesgo de incendios en este contexto particular.

El estudio de Vargas-Pérez et al. no solo desentraña la vulnerabilidad del Campo Experimental Las Cruces, sino que también sirve como un faro que ilumina la intersección entre la gestión ambiental y el comportamiento del fuego. Al examinar las variables clave, este trabajo proporciona una visión detallada y localizada que resulta invaluable para la comprensión de la dinámica de los incendios en este ecosistema específico.

Otro aporte significativo a nivel local proviene de la investigación de Torrescano et al. (2019), que se sumerge en la caracterización de combustibles y el comportamiento del fuego en plantaciones de *Callitropsis lusitanica*. Este enfoque específico en una especie particular añade capas de comprensión a la ecuación, considerando las particularidades de esta variedad de ciprés en el contexto de los incendios forestales.

Estas investigaciones no solo desglosan los factores que inciden en el riesgo de incendios en contextos locales específicos, sino que también ofrecen una ventana única hacia el potencial comportamiento del fuego en estos entornos particulares. La relevancia de sus resultados se proyecta más allá de las fronteras de sus ubicaciones geográficas, convirtiéndolos en bloques de construcción esenciales para la comprensión general de los incendios forestales.

En el crisol de la investigación local, la información detallada y específica proporcionada por estos estudios no solo enriquece nuestro conocimiento sobre la vulnerabilidad a incendios, sino que también establece un puente directo con la presente investigación. Al considerar estos trabajos como cimientos, se establece una base sólida para abordar el riesgo de incendios en nuestro contexto particular, utilizando la sabiduría extraída de investigaciones locales específicas para informar estrategias y decisiones.

2.5. Enfoques para la evaluación de riesgos de incendios

La evaluación precisa de los riesgos asociados a los incendios forestales se ha convertido en una tarea vital, requiriendo enfoques sofisticados que consideren tanto la probabilidad de ocurrencia como las potenciales consecuencias o impactos derivados de estos eventos (Andrews et al., 2005; Díaz, 2013).

Entre las metodologías destacadas, el método concebido por W. Fine en 1971 se erige como un pionero al priorizar situaciones de riesgo en función de las consecuencias, exposición y probabilidad asociadas. Este enfoque integral proporciona un marco robusto para la evaluación de riesgos, permitiendo una comprensión detallada de los posibles escenarios de incendios forestales.

En el ámbito de la simulación numérica del comportamiento del fuego, el programa BehavePlus emerge como una herramienta de vanguardia. Desarrollado para simular de manera precisa y detallada cómo puede comportarse el fuego en función de las características específicas del sitio y los combustibles presentes, BehavePlus se convierte en un aliado crucial en la gestión preventiva de incendios.

La aplicación conjunta de estos enfoques proporciona información invaluable para la gestión proactiva de incendios en plantaciones forestales. Al considerar tanto las variables de riesgo como las posibles consecuencias, estas estrategias no solo anticipan posibles escenarios, sino que también permiten una preparación más efectiva, dotando a los gestores forestales con herramientas sólidas para la toma de decisiones informadas.

La evaluación de riesgos de incendios forestales se beneficia enormemente de la aplicación de enfoques avanzados y herramientas tecnológicas como BehavePlus. Estas metodologías proporcionan no solo una comprensión más profunda de las complejidades de los incendios forestales, sino también una capacidad mejorada para prever, prevenir y gestionar estos eventos en plantaciones forestales.

2.6. Influencia de las condiciones climáticas en el comportamiento del fuego

En el intrincado ballet de los incendios forestales, las condiciones climáticas se erigen como la fuerza maestra, delineando la danza de la ignición y la propagación de estos eventos (Countryman, 1974).

La temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, precipitación y estabilidad atmosférica despliegan su influencia en esta narrativa. Estos elementos climáticos, como los destacados por Van Wagner en 1987 a través del Fire Weather Index (FWI) y el Buildup Index (BAI), actúan como notas en una partitura numérica, ofreciendo un análisis cuantitativo del riesgo de incendios. Esta metodología proporciona una perspectiva cuantitativa para anticipar y medir el riesgo en función de las condiciones climáticas.

En este escenario, la herramienta crucial es la integración de estas variables climáticas en modelos de simulación, con BehavePlus a la vanguardia. Este software, concebido para simular el comportamiento del fuego, se convierte en un escenario virtual donde las condiciones climáticas son manipuladas y evaluadas en relación con la propagación del fuego. Esta simulación, como un ensayo general detallado, resulta imprescindible para prever cómo el fuego podría comportarse en diversos escenarios climáticos.

Los resultados de estas simulaciones no son meros datos; son partituras que componen la sinfonía del diseño de estrategias de prevención y manejo de incendios en plantaciones forestales. Al comprender cómo las condiciones climáticas influyen en el comportamiento del fuego, los gestores forestales pueden ajustar sus estrategias, anticipándose a las variaciones climáticas y diseñando

respuestas más efectivas. Esta combinación de ciencia y tecnología se presenta como una herramienta fundamental en la lucha contra los incendios forestales, permitiendo una gestión más proactiva y eficiente.

Literatura consultada

- Andrews, P. L., Bevins, C. D., & Seli, R. C. (2005). BehavePlus fire modeling system, version 4.0: User's guide. General Technical Report RMRS-GTR-106WWW Revised. Ogden, UT: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 132 p.
- Bowman, D. M., Balch, J. K., Artaxo, P., Bond, W. J., Carlson, J. M., Cochrane, M. A., ... & Pyne, S. J. (2009). Fire in the Earth system. *Science*, 324(5926), 481-484.
- Brown, J. K., & Davis, K. P. (1973). *Forest fire: control and use*. McGraw-Hill.
- Burgan, R. E., & Rothermel, R. C. (1984). BEHAVE: fire behavior prediction and fuel modeling system-FUEL subsystem. General Technical Report INT-167. Ogden, UT: USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 126 p.
- Chandler, C., Cheney, P., Thomas, P., Trabaud, L., & Williams, D. (1983). *Fire in forestry: Vol. I. Forest fire behavior and effects*. John Wiley & Sons.
- Cruz, M. G., et al. (2003). Assessment of crown fire initiation and spread models using data from international crown fire modelling experiments. In *Proceedings of the 3rd International Wildland Fire Conference*, Sydney, Australia, 3-6 October 2003.
- Díaz, J. (2013). *Evaluación de riesgos. Una guía de bolsillo*. Madrid: Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- FAO. (2023, 20 de julio). Incendios forestales. Recuperado de <http://www.fao.org/forestry/firemanagement/es/>

- Fine, W. (1971). Mathematical evaluation for controlling risk. *Journal of Safety Research*, 3(4), 157-166.
- 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.
- Fosberg, M. A. (1970). Duff consumption by fire in relation to duff characteristics. Research Note INT-103. Ogden, UT: US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 4 p.
- Fosberg, M. A. (1970). Duff consumption by fire in relation to duff moisture content. Research Note INT-103. Ogden, UT: US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 4 p.
- Gómez-González, S., Torres-Díaz, C., Bustos-Schindler, C., & Gianoli, E. (2011). Anthropogenic fire drives the evolution of seed traits. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(46), 18743-18747.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). Censo de Población y Vivienda 2010. INEGI.
- IPCC (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC.
- Jardel, E. J., Martínez, M. L., & Moreno-Casasola, P. (2009). Efectos del fuego en la vegetación y la fauna. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 85, 105-119.
- Keeley, J. E., Safford, H., Fotheringham, C. J., Franklin, J., & Moritz, M. (2009). The 2007 southern California wildfires: Lessons in complexity. *Journal of Forestry*, 107(6), 287-296.
- Keane, R. E., Drury, S. A., Karau, E. C., Hessburg, P. F., & Reynolds, K. M. (2015). A method for mapping fire hazard and risk across multiple scales and its application in fire management. *Ecological Modelling*, 304, 77-102.

- Keane, R. E., et al. (2015). Representing climate, disturbance, and vegetation interactions in landscape models. *Ecological Modelling*, 309, 33-47.
- Lutes, D. C., et al. (2009). FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. p. CD.
- Mercker, D. (2017). Hardwood Management - Crop Tree Release. University of Tennessee Extension, SP731-C.
- National Geographic. (2022). Incendios forestales. Recuperado de <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/incendios-forestales>
- Rodríguez-Trejo, D. A., & Fulé, P. Z. (2003). Fire ecology of Mexican pines and a fire management proposal. *International Journal of Wildland Fire*, 12(1), 23-37.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2012). Programa de Manejo del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca. SEMARNAT.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2014). Programa de Manejo Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. SEMARNAT.
- Torrescano, N. (2019). *Callitropsis lusitanica* (Mill.) D.P. Little. In: Martínez, M., Cairns, M. A., & Torrescano, N. (Eds.), *Árboles de México: diversidad, distribución y usos* (pp. 101-104). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Torrescano, N. (2019). *Callitropsis lusitanica* (Mill.) D.P. Little. In: Martínez, M., Cairns, M. A., & Torrescano, N. (Eds.), *Árboles de México: diversidad, distribución y usos* (pp. 101-104). Universidad Nacional Autónoma de México.

- Vargas-Pérez, E., Castillo-Acosta, O., & Rodríguez-Trejo, D. A. (2017). Susceptibilidad a incendios forestales en el Campo Experimental Las Cruces, Texcoco, Estado de México. *Agroproductividad*, 10(4), 55-61.
- Vargas-Pérez, E., Rodríguez-Trejo, D. A., & Castillo-Acosta, O. (2018). Evaluación multicriterio de la susceptibilidad a incendios forestales en el Campo Experimental Las Cruces, Texcoco, Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(47), 110-135.
- Westerling, A. L., Hidalgo, H. G., Cayan, D. R., & Swetnam, T. W. (2006). Warming and earlier spring increase western US forest wildfire activity. *Science*, 313(5789), 940-943.

**Capítulo III Estimación de cargas de combustibles forestales aéreos en una
plantación de *Callitropsis lusitanica* (Mill) D.P. Little
Estimation of aerial forest fuels loads in a *Callitropsis lusitanica* (Mill) D.P.
Little plantation¹**

Jorge Alejandro-Aguilar Herrera, Dante Arturo-Rodríguez Trejo*, Amparo-Borja de la Rosa, Alejandro-Corona Ambriz

Universidad Autónoma Chapingo (UACH), Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales (MCCF), División de Ciencias Forestales (DICIFO), Carr. Federal México-Texcoco km 38.5, México. C. P. 56230. Tel. 01(552) 0576328. *Autor para correspondencia: (drodriguez@chapingo.mx). ORCID: 0000-0002-1407-8365.

Resumen

La cantidad de biomasa en las copas arbóreas es un factor clave en la propagación de incendios forestales. El objetivo de este estudio fue estimar las cargas de combustibles aéreos en la barranca situada entre el Campo Forestal Experimental las Cruces y Tequexquináhuac, México, para contribuir a la prevención de incendios. Se realizaron mediciones de biomasa foliar, de ramas vivas y muertas en parcelas de muestreo. Se desarrollaron modelos de regresión para predecir el peso seco a partir de variables morfológicas como longitud de ramas y diámetro de copa. También se simularon escenarios de ignición considerando contenido de humedad foliar y grosor de corteza. Se encontró alta variabilidad en la carga de combustibles entre sitios, con valores de 121 y 42 ton/ha. Los resultados proveen estimaciones cuantitativas útiles para la gestión local del riesgo de incendios. Se recomienda complementar con mediciones periódicas in situ para mapear la heterogeneidad espacial en el combustible forestal aéreo.

Palabras clave

Cargas de combustibles; biomasa aérea; intensidad crítica; prevención de incendios; gestión forestal.

¹ Este artículo se envió a la revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente

Abstract

The amount of biomass in tree canopies is a key factor in the spread of forest fires. The aim of this study was to estimate aerial fuel loads in the ravine located between the Las Cruces Experimental Forest Field and Tequexquináhuac, Mexico, to contribute to fire prevention. Measurements of foliar biomass, live and dead branches were taken in sample plots. Regression models were developed to predict dry weight based on morphological variables such as branch length and crown diameter. Ignition scenarios were also simulated considering foliar moisture content and bark thickness. High variability in fuel loads was found between sites, with values ranging from 121 to 42 tons/ha. The results provide useful quantitative estimates for local fire risk management. It is recommended to complement them with periodic on-site measurements to map spatial heterogeneity in aerial forest fuel.

Keywords

Fuel loads; aerial biomass; critical intensity; fire prevention; forest management.

Introducción

Los incendios forestales constituyen una amenaza global de gran relevancia, con un impacto devastador en los ecosistemas forestales y la biodiversidad. La multiplicidad de causas que desencadenan estos incendios, desde condiciones climáticas extremas hasta actividades humanas irresponsables e incluso provocaciones deliberadas, ha aumentado de manera alarmante la frecuencia y gravedad de estos siniestros en todo el mundo, tal como lo han señalado investigaciones desde los estudios pioneros de Byram (1959) hasta los más recientes trabajos de Fosberg (1970), Burgan y Rothermel (1984) y Rodríguez y Fulé (2003). Se ha evidenciado que cada componente de los combustibles forestales aéreos posee propiedades y características específicas que influyen en el comportamiento del fuego. Las copas de los árboles, al retener grandes cantidades de biomasa de combustible, se convierten en vías de propagación del fuego, destacando su relevancia en este contexto (Mercker, 2017). La presencia de

hojas secas forma una capa inflamable y su capacidad para ser transportada por el viento facilita la expansión del fuego. Las estructuras vegetales, como musgos, líquenes y helechos colgantes, pueden secarse y volverse inflamables, permitiendo que el fuego se propague desde el suelo hasta las copas de los árboles, como han demostrado estudios como los de Brown y Davies (1973), Chandler et al. (1983) y Pyne y Andrews (1996).

México, dotado de una amplia diversidad de ecosistemas forestales, que abarcan desde bosques tropicales hasta bosques de coníferas, no escapa a esta amenaza. El Estado de México, con su vasta cobertura boscosa y áreas naturales protegidas, se encuentra particularmente vulnerable a la ocurrencia de incendios forestales (López-González, 2023).

En el Estado de México, las condiciones climáticas adversas y la presencia de combustibles forestales aéreos, como hojas secas y ramas, incrementan notablemente la probabilidad de incendios forestales en esta región (Rojas, 2022).

En el Campo Experimental Las Cruces en Texcoco y Tequexquínahuac en el Estado de México, se presentan reservorios de combustibles forestales, tanto superficiales como aéreos. Los combustibles forestales superficiales, que incluyen hojas, ramas y corteza, se distribuyen en el suelo y en la superficie de los árboles. Los combustibles forestales aéreos, representados por ramas y copas de los árboles, se ubican en el dosel del bosque.

Los objetivos del estudio son caracterizar los combustibles del dosel, considerando las principales variables relacionadas con el inicio y la propagación del fuego de copas, con el fin de contribuir a la gestión forestal y la prevención de incendios en el Campo Forestal Experimental Las Cruces, estimar las cargas de combustibles aéreos, la obtención de otras variables estructurales de combustibles aéreos, como altura de copas, densidad de la copa, distancia entre copas y contenido de humedad foliar, estimar la intensidad crítica del incendio superficial para producir un incendio de copas y evaluar el comportamiento de incendios de copa bajo diferentes

escenarios de tiempo atmosférico, pendiente y combustibles, utilizando el programa Behave Plus.

Materiales y métodos

3.1. Descripción del área de estudio

Esta investigación se desarrolló en la barranca situada entre el Campo Forestal Experimental las Cruces, en la región oriental del Estado de México, y el centro sur de los municipios de Texcoco y Tequexquináhuac. Geográficamente, se encuentra entre los meridianos 98.83° y 98.80° de longitud oeste, y entre los paralelos 19.45° y 19.47° de latitud norte, a una altitud que oscila entre 2480 y 2640 metros sobre el nivel del mar (Figura 1).

3.2. Muestreo

Se seleccionaron aleatoriamente 30 sitios, cada uno abarcando un área de 400 metros cuadrados (20 m x 20 m). Se realizaron mediciones relacionadas con la estructura arbórea: el número de árboles, especie, diámetro normal (1.3), altura, altura de la primera rama viva, altura de la primera rama seca, número de ramas verdes, número de ramas secas y el diámetro de la copa en las direcciones norte-sur y este-oeste.

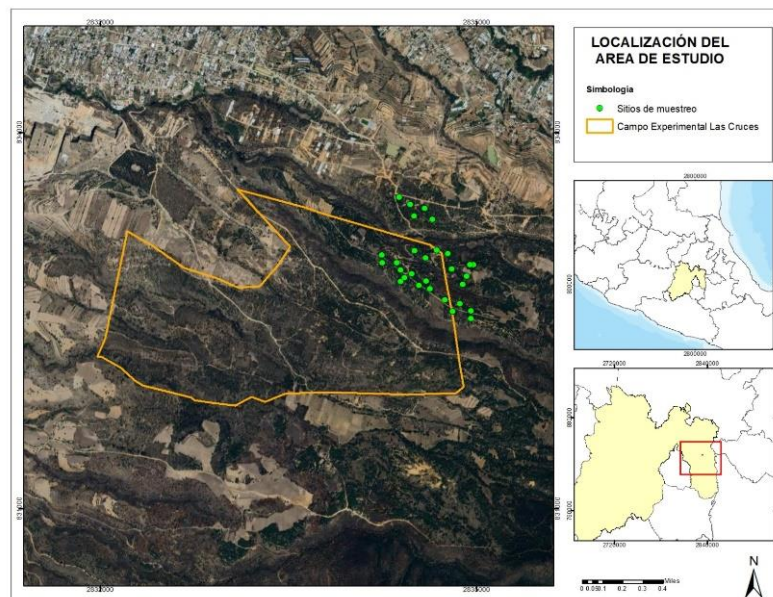


Figura 1. Ubicación del área de estudio: Las Cruces y Tequexquináhuac

Además, se realizó un submuestreo de la estructura del dosel en cada uno de los sitios, utilizando un serrucho para cortar tres ramas vigorosas de diferentes longitudes: larga, intermedia y corta. Se aplicaron criterios de representatividad y diversidad, asegurando que las muestras abarcaran una amplia gama de tamaños y características. Cada una de estas ramas fueron medidas y posteriormente se extrajeron tres rodajas que incluían el follaje y ramillas.

3.2.1. Propuesta de metodología del “Árbol ideal”

Se aplicó una metodología denominada “Árbol ideal”; la cual permitió caracterizar la estructura y distribución de las ramas en los árboles de *Callitropsis lusitanica*.

Esta metodología se basa en modelos estadísticos (modelos de regresión); los cuales se ajustaron con las observaciones y mediciones directas de las ramas de los árboles en la región de estudio para proporcionar una comprensión de la arquitectura de los árboles.

En cada árbol muestreado, se eligieron estratégicamente tres ramas que cumplieran con criterios específicos de representatividad y diversidad. Se priorizó la selección de ramas frondosas, libres de daños causados por plagas, sin señales de podas o incendios, y en estado general de buena salud. Este enfoque garantizó una muestra integral y representativa, considerando la vitalidad y condiciones naturales de las ramas seleccionadas.

En cada rodaja, se midieron diámetros extremos (D_1 y D_2). A partir de estos dos diámetros, se calculó un diámetro promedio para cada rodaja. Se estimó el área de cada rodaja (ar) por la longitud de la rodaja (lr) y su volumen (vr) con las siguientes fórmulas:

$$ar = \pi \left(\frac{D_1 + D_2}{4} \right)^2 \quad (1)$$

$$vr = ar * lr \quad (2)$$

La estimación de la conexión entre las diferentes rodajas de una misma rama se realizó considerando la longitud de cada rodaja (lr) y los diámetros correspondientes (D_1 y D_2). El cálculo de la longitud total de la rama se efectuó sumando la longitud de cada rodaja y los diámetros de la rodaja grande (g), la rodaja mediana (m) y la rodaja chica (c), así como los segmentos (seg) correspondientes entre ellas. En términos más específicos, la fórmula para la longitud total de la rama (lr_{total}) se expresó de la siguiente manera:

$$lr_{total} = lr_g + D_{2g} + seg_1 + D_{1m} + D_{2m} + seg_2 + D_{1c} + D_{2c} + seg_3 \quad (3)$$

Se procedió a medir el peso seco de cada rodaja después de su secado en una estufa del laboratorio. Para obtener el peso seco de las rodajas, se empleó la siguiente ecuación:

$$Peso\ seco\ (ps) = peso\ inicial\ (pei) - peso\ final\ (pef) \quad (4)$$

Donde:

pei : es el peso inicial de la rodaja antes del secado.

pef : es el peso final de la rodaja después del secado.

Con los valores de peso seco obtenidos para cada rodaja, se procedió a calcular la densidad de la madera (dem) para cada una utilizando la fórmula:

$$dem = \frac{ps}{vr} \quad (5)$$

En relación con el volumen total de la rama, este se calculó sumando los volúmenes estimados en las tres secciones de la rama. La fórmula utilizada para obtener el volumen total de la rama se basa en los volúmenes individuales de cada segmento, como se muestra a continuación:

$$Vol_{total} = vol_{seg1} + vol_{seg2} + vol_{seg3} \quad (6)$$

Donde:

$vol_{seg1}, vol_{seg2}, vol_{seg3}$ son los volúmenes estimados para cada segmento de la rama.

Finalmente se determinó el peso seco de cada rama multiplicando su volumen por la densidad promedio. Este cálculo proporcionó el peso seco de cada rama en cada uno de los componentes (Figura 2); es decir, se obtuvo el peso seco total de la rama (PST), peso seco de las ramas vivas (PSRV), peso seco de las ramas muertas (PSRM) y el peso seco de las hojas (PSH).

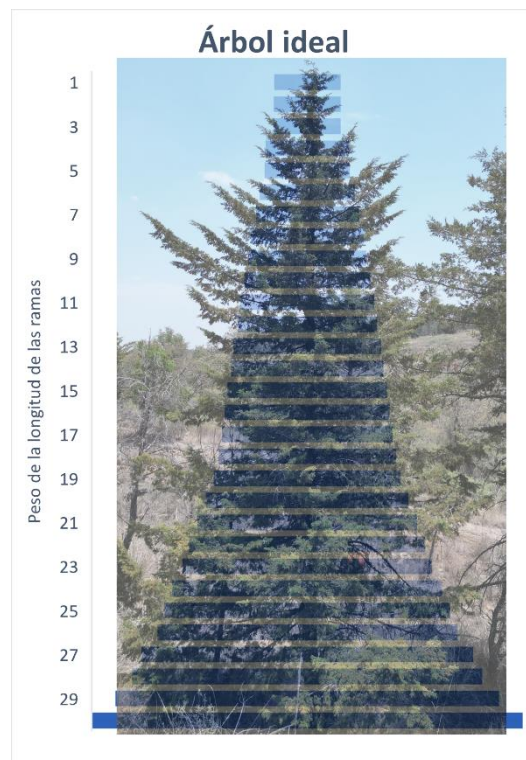


Figura 2. Perfil vertical de los combustibles forestales aéreos

Para determinar la existencia de una relación entre la longitud de la rama (LR) y el PST, el PSRV, el PSRM y el PSH, se aplicaron modelos de regresión lineal simple. Es decir;

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 LR + \varepsilon_i ; i=1,2,3,\dots,n$$

Donde: ε es el error aleatorio con distribución $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$.

Considerando las variables de interés, los modelos de regresión a ajustar son:

$$PST = \beta_0 + \beta_1 LR + \epsilon \quad (7)$$

$$PSRM = \beta_0 + \beta_1 LR + \epsilon \quad (8)$$

$$PSRV = \beta_0 + \beta_1 LR + \epsilon \quad (9)$$

$$PSH = \beta_0 + \beta_1 LR + \epsilon \quad (10)$$

Para verificar los supuestos de los modelos propuestos, se usará la prueba de Breusch-Pagan y Shapiro-Wilk para probar la homocedasticidad y normalidad de los residuales respectivamente

Una vez obtenida la información se ajustarán los modelos de regresión lineal múltiple para estimar el PST, PSRM, PSRV y PSH en función de la altura del árbol (aa), número de ramas vivas (nrv), espesor de la corteza (ec), y diámetro promedio de la copa (dpc).

Es decir, los modelos de regresión múltiple son:

$$PST_i = \beta_0 + \beta_1 aa_i + \beta_2 nrv_i + \beta_3 ec_i + \beta_4 dpc_i + \varepsilon_i; \quad i = 1,2,3, \dots, n. \quad (11)$$

$$PSRM_i = \beta_0 + \beta_1 aa_i + \beta_2 nrv_i + \beta_3 ec_i + \beta_4 dpc_i + \varepsilon_i; \quad i = 1,2,3, \dots, n \quad (12). \quad)$$

$$PSRV_i = \beta_0 + \beta_1 aa_i + \beta_2 nrv_i + \beta_3 ec_i + \beta_4 dpc_i + \varepsilon_i; \quad i = 1,2,3, \dots, n. \quad (13)$$

$$PSH_i = \beta_0 + \beta_1 aa_i + \beta_2 nrv_i + \beta_3 ec_i + \beta_4 dpc_i + \varepsilon_i; \quad i = 1,2,3, \dots, n \quad (14).$$

Donde:

PST, PSRM, PSRV y PSH: son las variables respuestas (dependientes).

β_0 : es el intercepto.

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ y β_4 : son los coeficientes de regresión de las variables explicativas (independientes): aa, nr, ec y dpc, respectivamente.

ε_i : representa el error aleatorio que recoge la variabilidad no explicada por las variables independientes. $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$.

Para comprobar las regresiones lineales múltiples se aplicará validación cruzada y la división de los datos en conjuntos de entrenamiento (80%) y prueba (20%).

3.2.2. Metodología de BeHave Plus

Se empleará el software Behave Plus, desarrollado por Andrew Simkin y su equipo en la Universidad de California, Berkeley, para la modelación de incendios forestales. La metodología se fundamenta en la recopilación y preparación de datos, así como en la especificación de los parámetros del modelo.

La simulación comprenderá la variación de escenarios mediante la manipulación de los valores de los parámetros. Estos escenarios estarán diseñados para representar condiciones de intensidad de incendio baja y alta.

Dado que es esencial estimar la intensidad crítica del incendio superficial para determinar su impacto en las copas, se utilizarán fórmulas específicas, como la proporcionada por Van Wagner (1977), que tiene en cuenta la altura a la base de copas vivas y el contenido de humedad foliar. Esto permitirá evaluar con mayor precisión el comportamiento del incendio y sus posibles efectos en las plantaciones.

Resultados

3.3. Modelación de los combustibles aéreos del cedro blanco.

Para estimar los combustibles aéreos se ajustaron modelos de regresión simple cuya variable explicativa fue la LR; es decir, para estimar el peso seco total de la rama (PST), peso seco de las ramas vivas (PSRV), peso seco de las ramas muertas (PSRM) y el peso seco de las hojas (PSH), se utilizaron los siguientes modelos ajustados:

Modelo de regresión para estimar el PST:

$$\widehat{PST} = -0.161372 + 0.003021 * LR \quad (15)$$

Modelo para estimar el PSRV:

$$\widehat{PSRV} = -0.1955929 + 0.0020360 * LR \quad (16)$$

Modelo para estimar elPSRM:

$$\widehat{PSRM} = -0.01468 + 0.0005097 * LR \quad (17)$$

Modelo para estimar el PSH:

$$\widehat{PSH} = 0.0470067 + 0.0004693 * LR \quad (18)$$

En el cuadro se presentan los estimadores de cada uno de modelos ajustados, así como el estadístico de prueba y el coeficiente de determinación correspondiente. De acuerdo con dichos resultados se observa que todos los modelos ajustaron resultaron significativos considerando un nivel de significancia de 0.05. Es decir, las variables PST, PSRV, PSRM y PSH dependen de la longitud de la rama. Los resultados de los análisis de regresión simple revelaron que la longitud de la rama tiene una influencia estadísticamente significativa en el peso de la rama. Los coeficientes del modelo se describen a continuación.

Cuadro 1. Coeficientes de regresión para los modelos de regresión lineal simple entre la longitud de la rama y las variables de respuesta

Variable respuesta	Parámetro	Estimador	Estadístico de prueba t	p_valor	Coeficiente de determinación (R ²)
PST	β_0	-0.1613721	-3.258	0.00162	0.6155
	β_1	0.0030212	11.526	< 2e-16	
PSRV	β_0	-0.195593	-5.057	2.51e-06	0.5437
	β_1	0.002036	9.946	8.44e-16	
PSRM	β_0	-0.01468	-1.057	0.294	0.3667
	β_1	0.0005097	6.933	< 0.0001	
PSH	β_0	0.0470067	1.905	0.060251	0.1346
	β_1	0.0004693	3.593	0.000553	

Los modelos de regresión simple encuentran respaldo visual en los gráficos de dispersión. Estos gráficos simplifican la interpretación de la relación entre la LR y las distintas respuestas.

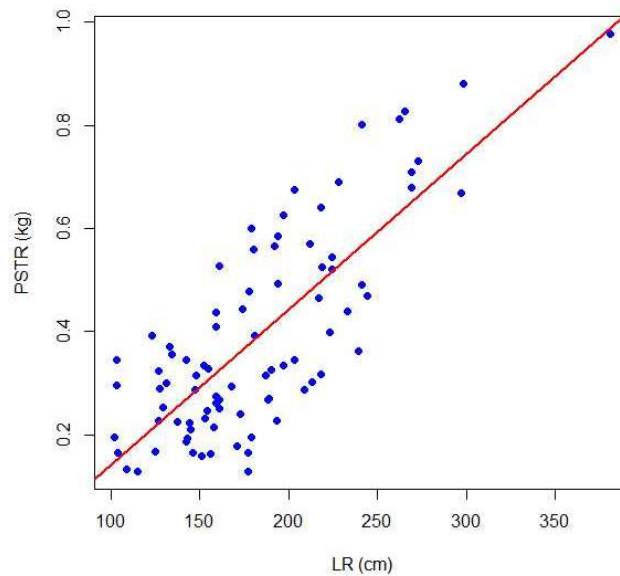


Figura 3. Relación entre la longitud de la rama y el peso seco total de la rama

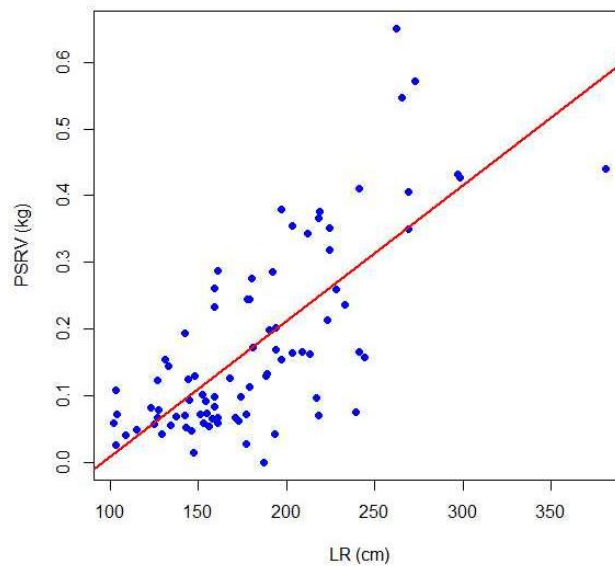


Figura 4. Relación entre la longitud de la rama y el peso seco de la rama viva

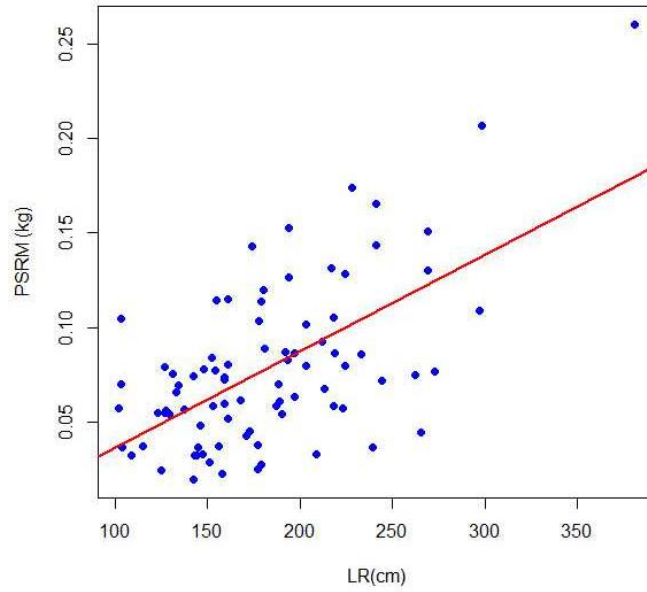


Figura 5. Relación entre la longitud de la rama y el peso seco de las ramillas muertas

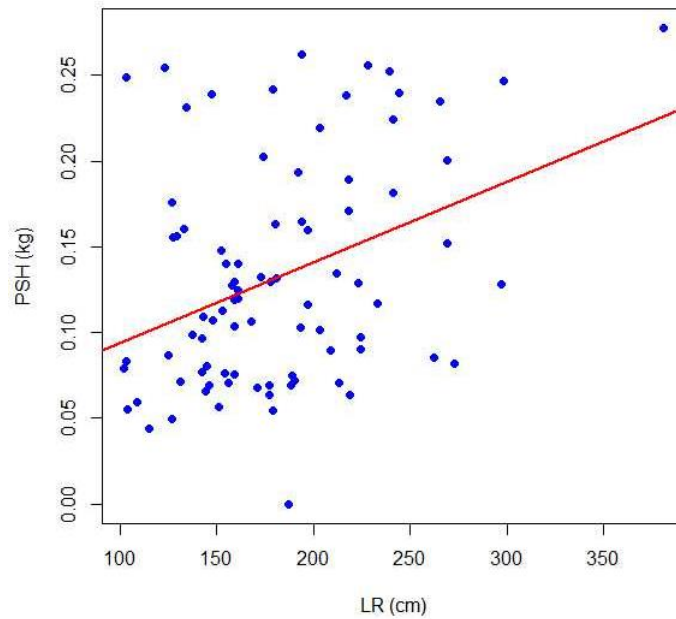


Figura 6. Relación entre la longitud de la rama y el peso seco de la biomasa

LR resulta ser un buen indicador para predecir el PST y PSRV. Sin embargo, esta relación es moderada-baja para el PSRM y muy baja para el PSH, según los valores de R^2 . Esto sugiere que la LR tiene un impacto notable en algunas métricas de peso seco, pero no explica completamente la variabilidad observada en todas las variables. Por lo tanto, es posible que otros factores también estén influyendo.

3.4. Validación del modelo de regresión

Utilizando la prueba homocedasticidad se presentan los resultados de los modelos:

- Para el modelo PST

La prueba de Breusch-Pagan indica que no hay evidencia para rechazar la hipótesis nula de homocedasticidad ($p\text{-valor} = 0.1821 > 0.05$), por lo que se cumple el supuesto de homocedasticidad.

El gráfico de residuos contra valores ajustados también sugiere una dispersión aleatoria, apoyando la homocedasticidad.

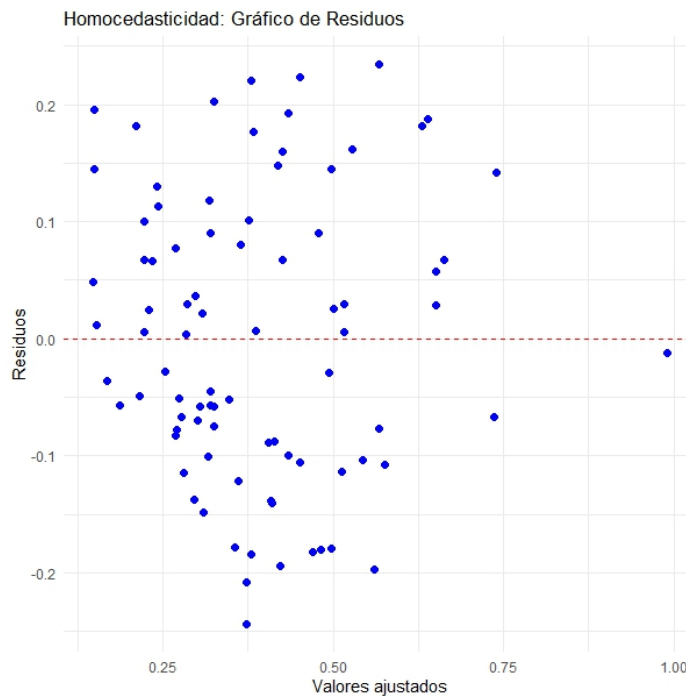


Figura 7. Gráfico de residuos contra valores ajustados del PST ~LR

La prueba de Shapiro-Wilk no rechaza la normalidad de los residuos al nivel de significancia del 5% ($p\text{-valor} = 0.05062 > 0.05$), indicando que se cumple el supuesto de normalidad.

Para el modelo PSRV

La prueba de Breusch-Pagan ($p\text{-value} = 0.0001128$) indica que hay evidencia para rechazar la hipótesis nula de homocedasticidad. Esto sugiere que no se cumple el supuesto de homocedasticidad en este modelo, lo que significa que la variabilidad de los residuos no es constante en función de los valores ajustados.

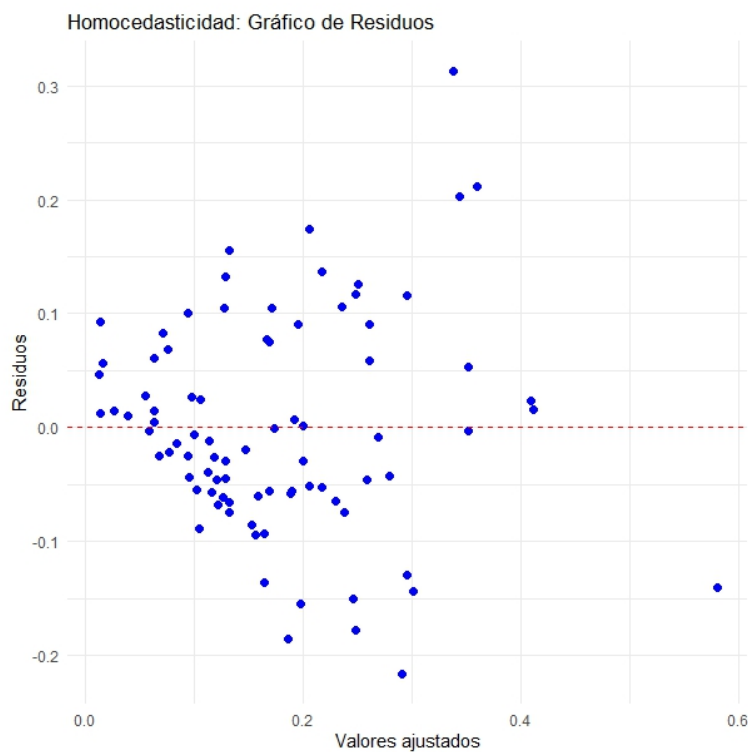


Figura 8. Gráfico de residuos contra valores ajustados del PSRV ~LR

La prueba de Shapiro-Wilk ($p\text{-value} = 0.2815$) no proporciona evidencia para rechazar la hipótesis nula de normalidad. Esto indica que se cumple el supuesto de normalidad de los residuos en el modelo PSRV.

Para el modelo PSRM:

La prueba de Breusch-Pagan rechaza la hipótesis nula de homocedasticidad ($p\text{-valor} = 1.608e-05 < 0.05$), indicando heterocedasticidad.

El gráfico de residuos muestra una tendencia, apoyando la presencia de heterocedasticidad.

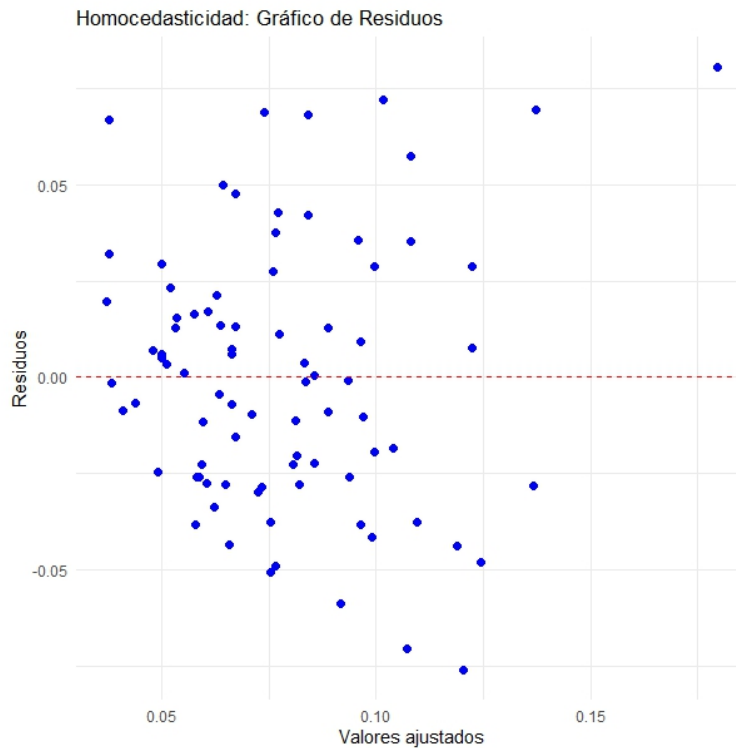


Figura 9. Gráfico de los residuos contra valores ajustados PSRM~LR

La prueba de Shapiro-Wilk no rechaza la hipótesis nula de normalidad ($p\text{-valor} = 0.3642 > 0.05$), por lo que se cumple el supuesto de normalidad.

Para el modelo PSH:

Las pruebas de Breusch-Pagan y del score chi-cuadrado no rechazan la hipótesis nula de homocedasticidad ($p\text{-valor} > 0.05$), indicando homocedasticidad.

El gráfico de residuos es aleatorio, consistente con homocedasticidad.

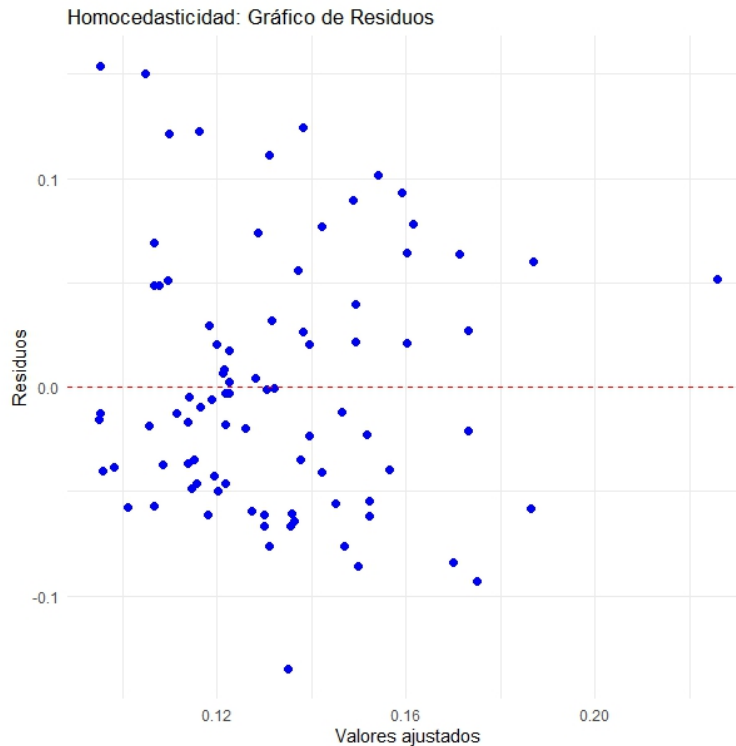


Figura 10. Gráfico de los residuos contra valores ajustados PSH~LR

La prueba de Shapiro-Wilk rechaza la normalidad de los residuos ($p\text{-valor} = 0.01594 < 0.05$), incumpliendo el supuesto.

En el análisis retrospectivo, se encontró que el modelo PST cumplió con los supuestos de homocedasticidad y normalidad, respaldando la idoneidad del modelo para describir de manera efectiva la relación entre la longitud de la rama y el peso seco total de la misma. Estos hallazgos concuerdan con investigaciones anteriores que también identificaron relaciones significativas entre las dimensiones morfológicas de las ramas y su peso seco en diversas especies forestales, como se evidenció en estudios previos como los realizados por Lee et al. (2021) y Arévalo-Martínez et al. (2016).

En contraste, el modelo PSRV, si bien mostró falta de homocedasticidad, cumplió con el supuesto de normalidad. Esto sugiere que, a pesar de la variabilidad observada en los residuos, la relación entre la LR y el PSRV sigue siendo válida. No obstante, es importante tener presente la presencia de heterocedasticidad al

interpretar los resultados de este modelo, ya que podría influir en la precisión de las predicciones.

Por otro lado, el modelo PSRM exhibió heterocedasticidad, indicando que la variabilidad de los residuos no se mantiene constante en relación con los valores ajustados. Aunque este modelo cumplió con el supuesto de normalidad, la presencia de heterocedasticidad sugiere que podría haber afectado la precisión de las predicciones.

Con respecto a PSH, a pesar de cumplir con la homocedasticidad, la falta de normalidad en los residuos indica que este modelo puede no ser la mejor representación de la relación entre la longitud de la rama y el peso seco de las hojas

3.5. Modelo árbol ideal

Luego de realizar regresiones lineales simples y verificar la metodología, se han desarrollado cuatro modelos de regresión lineal múltiple con el propósito de comprender cómo ciertas variables influyen en el peso seco de las ramas.

Cuadro 2. Coeficientes de modelos de regresión lineal múltiple para predecir peso seco de ramas

Modelo	Variable independiente	Coeficiente
PST	aa	-0.0010826
	nrv	0.0002440
	ec	-0.0344623
	dpc	0.0006067
PSRV	aa	-0.0010934
	nrv	0.0002085
	ec	-0.0217758
	dpc	0.0012955
PSRM	aa	-0.0029020
	nrv	0.0006059
	ec	-0.0711800
	dpc	0.0027100
PSH	nrv	-1.291e-15
	dpc	0.0004693

Se emplearon modelos de regresión para estimar el peso seco de las ramas, tanto el total PST, como PSRV, PSTRM y PSH. A continuación, se muestran:

Altura del árbol: Se observó que un aumento en la altura del árbol se asoció con una disminución en el PST y PSRV. Este fenómeno se atribuye a que las ramas de árboles más altos tienden a ser más delgadas y tener menos hojas. Desde la perspectiva de incendios forestales, esto podría impactar la velocidad de propagación del fuego, ya que las ramas delgadas y con menos hojas podrían arder más rápidamente.

Número de ramas vivas: Un incremento en el número de ramas vivas se asoció con un aumento en el PSRV. En términos de incendios, esto sugiere que áreas con mayor densidad de ramas vivas podrían tener una carga combustible más elevada, afectando la intensidad del fuego.

Espesor de la corteza: Se encontró una relación inversa entre el aumento en el espesor de la corteza y la disminución en el PST. Esto sugiere que la corteza más gruesa podría actuar como un factor protector al reducir la cantidad de material combustible. En el contexto de incendios, esto podría traducirse en una contribución menor al fuego por parte de las ramas con corteza más gruesa.

Diámetro promedio de la copa: La asociación positiva entre el aumento en el diámetro promedio de la copa y el incremento en el PST y PSRV indica que los árboles con copas más grandes tienen más material combustible. Esto podría influir significativamente en la propagación del fuego, ya que las copas más grandes pueden contribuir de manera sustancial a la carga combustible.

Modelo PSH: Este modelo mostró que el peso seco de las hojas está positivamente relacionado con el diámetro promedio de la copa. Esto sugiere que las hojas tienden a ser más pesadas en árboles con copas más grandes. En términos de incendios, esto podría indicar que áreas con árboles de copas grandes pueden tener una carga

combustible más elevada en forma de hojas más pesadas, afectando la dinámica del fuego.

Para confirmar la validez del modelo se realizó una inspección de los datos y se aplicó la verificación de los modelos. A continuación, se muestran los resultados:

El modelo PST exhibe un ajuste satisfactorio, respaldado por un R^2 ajustado de 0.7972. La ausencia de heterocedasticidad y problemas de normalidad en los residuos sugiere que este modelo es válido para estimar el peso seco total de las ramas. La consistencia con datos previos respalda su aplicabilidad en la descripción de la relación entre la longitud de la rama y el peso seco total.

A pesar de los notables R^2 ajustados en los modelos PSRV (0.9595) y PSRM (0.9431), se identificaron problemas de falta de homocedasticidad en el primero y heterocedasticidad en el segundo, lo que podría afectar la consistencia de las predicciones. Además, aunque el modelo PSH mostró un rendimiento aparentemente perfecto con un R^2 ajustado de 1, la falta de normalidad en los residuos plantea dudas sobre su capacidad para representar con precisión la relación entre la longitud de la rama y el peso seco de las hojas. Se aconseja precaución al interpretar y utilizar estos modelos, ya que sus limitaciones pueden influir en la validez de las predicciones.

3.6. Cargas de combustibles aéreos

Al confirmar la aplicabilidad de los modelos para estimar las cargas de combustibles aéreos, los resultados revelan patrones que vinculan las características de los árboles con la cantidad de materia combustible aéreo, esencial para la gestión del riesgo de incendios.

En líneas generales, se observa que el PST es más elevado en sitios con árboles más altos y copas más grandes, apoyando los modelos de regresión. Esto sugiere que áreas con árboles más desarrollados albergan mayores cantidades de combustibles aéreos, lo que podría tener implicaciones importantes en la propagación y severidad de incendios forestales.

El PSRV sigue un patrón similar, presentando cargas más altas en sitios con árboles más imponentes. Este fenómeno se atribuye a la presencia de madera y hojas, componentes más pesados de las ramas, en concordancia con las observaciones.

En contraste, el PSRM es menor en áreas con árboles más altos y copas más grandes. Esto podría explicarse por la delgadez de las ramas muertas y su menor cantidad de hojas en comparación con las ramas vivas.

En el PSH, se observa que es mayor en sitios con árboles más altos y copas más grandes. Esto se vincula con la mayor exposición solar que reciben las copas más extensas, fomentando la fotosíntesis y resultando en hojas más grandes y pesadas.

Las observaciones detalladas subrayan estos patrones identificados. En el sitio 1, donde los árboles son más bajos y las copas más pequeñas, la carga de peso seco total de las ramas es la más baja, registrando 1.0356 toneladas. Por el contrario, en el sitio 2, caracterizado por árboles más altos y copas más grandes, la carga es significativamente más alta, alcanzando las 4.8483 toneladas.

En cuanto al peso seco de las ramas vivas, el sitio 11, con árboles más bajos y copas más pequeñas, presenta la carga más baja con 0.8737 toneladas. Mientras que en el sitio 30, donde los árboles son más altos y las copas más grandes, la carga es más elevada, llegando a 1.6529 toneladas.

En lo que respecta al peso seco de las ramas muertas, el sitio 1, con árboles más bajos y copas más pequeñas, lidera con 0.0132 toneladas, mientras que el sitio 27, con árboles más altos y copas más grandes, muestra la carga más baja, con 0.0167 toneladas.

Por último, el peso seco de las hojas también sigue esta tendencia. El sitio 1, con árboles más bajos y copas más pequeñas, tiene la carga más baja, registrando 0.0006 toneladas, mientras que el sitio 30, caracterizado por árboles más altos y copas más grandes, muestra la carga más alta, alcanzando las 0.0269 toneladas.

3.7. Simulaciones de la intensidad crítica

La intensidad crítica del incendio superficial (I_o) se estima según la fórmula proporcionada por Van Wagner (1977):

$$I_o = (0.01 * LCBH * (450 + 26 * FMC)^{1.5} \quad (19)$$

Donde:

I_o : es la intensidad crítica del incendio superficial para generar incendio de copas.

$LCBH$: es la altura a la base de copas vivas.

FMC : es el contenido de humedad foliar.

Ejemplo:

Tomando $LCBH = 4$ m y $FMC = 120\%$, sustituyó los valores en la fórmula:

$$I_o = (0.01 * 4 * (450 + 26 * 120)^{1.5}$$

$$I_o = 1,706.4 \text{ kW/m}$$

Este resultado indica que, en el ejemplo dado, la intensidad crítica del incendio superficial necesaria para generar un incendio de copas.

Los valores de Intensidad Crítica (I_o) son comparados con los valores observados (I_b) para determinar la posibilidad de incendio aéreo.

Cuadro 3. Simulación de Intensidad de Incendios utilizando Behave Plus

Escenario	Intensidad	Vel. Propagación (m/min)	Longitud de Llama (m)	Intensidad Crítica (I_o)
Pastos y sotobosque	Baja	0.7	181.5	57.33
	Alta	0.5	7.2	18,708.17
Hojarasca y sotobosque	Baja I	0.4	37.3	85.15
	Alta	0.6	5.7	11,268.55

La simulación para diferentes escenarios, como pastos y sotobosque, así como hojarasca y sotobosque, evidencia que I_o es especialmente alta en situaciones de alta intensidad y en presencia de combustibles finos. Este resalta la importancia de

considerar diversos factores ambientales y características del combustible al evaluar el riesgo de incendios.

Relacionando estos resultados con las cargas de combustibles aéreos, se confirman las tendencias observadas en los modelos de regresión. Las áreas con árboles más altos y copas más grandes exhiben mayores cargas de PST. Este patrón es consistente con la noción de que árboles más desarrollados albergan mayores cantidades de combustibles aéreos, lo que puede tener consecuencias significativas en la propagación y severidad de los incendios forestales.

Discusión

En el marco de la investigación sobre la estimación de cargas de combustibles aéreos en plantaciones de cedro blanco en México, los modelos de regresión desarrollados ofrecen estimaciones robustas y cuantitativas.

Aunque el estudio de Lee et al. (2021) sirve como referencia metodológica, se destaca la singularidad y primacía de la presente investigación. Ambos estudios comparten la utilización de modelos para estimar la carga de combustibles a diferentes alturas del dosel, evidenciando la importancia de considerar prácticas silvícolas al modelar la estructura de los combustibles aéreos.

Los modelos de regresión, particularmente aquellos que vinculan la longitud de la rama con el peso seco, encuentran respaldo en investigaciones previas. Tewari et al. (2013), por ejemplo, reportaron correlaciones significativas entre dimensiones morfológicas de ramas y biomasa en especies forestales de la India. Estudios en pino ponderosa y pino lodgepole también respaldan la relación entre la longitud de la rama y el peso seco (Keyes y O'Hara, 2002).

La inclusión de referencias como Agee (1996), que destaca la influencia de la estructura forestal en el comportamiento del fuego, fortalece la discusión sobre la importancia de comprender detalladamente las cargas de combustibles aéreos para evaluar y prevenir riesgos de incendios.

Adicionalmente, la investigación de Cruz et al. (2003, 2004) sobre las características de los estratos de combustible en bosques propensos a incendios de copa en América del Norte proporciona una perspectiva valiosa para contextualizar los resultados obtenidos en el estudio en cuestión.

La relevancia de considerar el manejo forestal en la modelación de combustibles aéreos se respalda con trabajos como el de Graham et al. (1999) y David et al. (2008), que exploran los efectos de tratamientos silvícolas en el comportamiento del fuego en bosques del oeste de los Estados Unidos.

Asimismo, la aplicación de modelos alométricos, en línea con el enfoque de "árbol ideal", encuentra respaldo en la metodología propuesta por Contreras et al. (2012) para evaluar la conectividad de combustibles a nivel de árbol y su relación con la reducción del potencial de incendios de copa.

La discusión se amplía al abordar modelos de regresión múltiple, que también concuerdan con la literatura existente. Investigaciones como la de Brown (1978) y Gould et al. (2008) respaldan la relación entre la altura del árbol, el diámetro de copa y el número de ramas con el peso seco de ramas en diversas especies.

En relación con los efectos de los parámetros evaluados en las simulaciones, existe una abundante evidencia sobre su influencia en la inflamabilidad y combustibilidad. Por ejemplo, estudios experimentales indican que reducciones en el contenido de humedad foliar incrementan la ignición y propagación del fuego (Dimitrakopoulos y Papaioannou, 2001), y la altura del árbol se asocia positivamente con la biomasa de copa y el riesgo de incendios (Fry y Stephens, 2010).

Conclusión

Este estudio estimó las cargas de combustibles aéreos en la barranca situada entre el Campo Forestal Experimental las Cruces, en la región oriental del Estado de México, y el centro sur de los municipios de Texcoco y Tequexquináhuac. Se cosecharon 30 sitios de muestreo, cada uno abarcando un área de 400 metros

cuadrados (20 m x 20 m). Utilizando los datos se desarrolló una distribución vertical de las cargas de combustibles aéreos.

Los resultados del estudio mostraron que la carga de combustibles aéreos en las plantaciones de cedro blanco en la región oriental del Estado de México es variable, con valores entre 2.22 kg/m² y 13.33 kg/m². La distribución vertical de los combustibles aéreos es similar a la descrita en otras especies forestales, con una mayor concentración en el estrato inferiores (PST).

Los modelos de regresión desarrollados en este estudio proporcionan estimaciones robustas y cuantitativas de las cargas de combustibles aéreos a partir de predictores morfológicos no destructivos. Estos modelos explicaron altos porcentajes de la variabilidad en el peso seco de ramas totales, ramas vivas, ramas muertas y hojas.

La simulación de escenarios reveló que el contenido de humedad foliar, la altura del árbol, el número de ramas, el diámetro de copa y el espesor de corteza influyen significativamente en la carga de combustibles aéreos. Los resultados concuerdan con investigaciones previas sobre factores determinantes de la inflamabilidad.

El estudio evidenció una variabilidad sustancial en la carga de combustibles entre los sitios. Esta heterogeneidad espacial resalta la importancia de realizar estimaciones locales detalladas para identificar zonas de alto riesgo de incendios forestales.

Esta investigación aporta modelos y conocimientos útiles para mejorar las evaluaciones del riesgo de incendios y contribuir a una gestión preventiva más efectiva en las zonas forestales de la región. Se recomienda complementar con mediciones periódicas a escala local.

Literatura consultada

Agee, J. K. (1996). The influence of forest structure on fire behavior. Proceedings of the 17th Annual Forest Vegetation Management Conference, California, 52-68.

- Andrews, P. L. (2007). Factors relevant for calculating fire intensity and estimating fire behavior. *Fire Management Today*, 67(2), 48-52.
- Alexander, M. E., Stefner, C. N., Mason, J. A., Stocks, B. J., Hartley, G. R., Maffey, M. E., Wotton, B. M., Taylor, S. W., Lavoie, N., & Dalrymple, G. N. (2004). Characterizing the jack pine-black spruce fuel complex of the International Crown Fire Modelling Experiment (ICFME). Report.
- Anderson, R. E. (1982). The development and use of the FOREST FIRE MODEL. U.S. Department of Agriculture Forest Service General Technical Report INT-142. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.
- Arumí, J., Bosch, O., & Casals, N. (2009). A review of fire spread models in Mediterranean forests. *Forest Ecology and Management*, 258(1), 1-18.
- Brown, J. K. (1978). Predicting diameters of ponderosa pine branches. *Forest Science*, 24(4), 504-506.
- Brown, J. K., & Davies, D. G. (1973). The flammability of lichens. *Canadian Journal of Botany*, 51(1), 13-21.
- Brown, J. K., & Keane, R. E. (2017). Fire behavior and modeling. In J. F. McDonald, J. T. Abatzoglou, & J. A. Westerling (Eds.), *Wildland fire science* (pp. 155-178). Cham, Switzerland: Springer.
- Burgan, R. E., & Rothermel, R. C. (1984). Predicting fire behavior and flame lengths in wildland fires. In *Proceedings of the 1984 Tall Timbers Fire Ecology Conference* (Vol. 14, pp. 1-25). Tallahassee, FL: Tall Timbers Research Station.
- Byram, G. M. (1959). Some factors affecting the spread of forest fires. *Journal of Forestry*, 57(1), 2-8.

- Contreras, M. A., Russell, A. P., & Chung, W. D. (2012). Modeling tree-level fuel connectivity to evaluate the effectiveness of thinning treatments for reducing crown fire potential. *Forest Ecology and Management*, 264(5), 134-149.
- Chandler, D. J., Peterson, D. L., & Brown, J. K. (1983). The flammability of epiphytic mosses. *Canadian Journal of Botany*, 61(11), 2753-2757.
- Cruz, M. G., Alexander, M. E., & Wakimoto, R. H. (2003). Assessing canopy fuel stratum characteristics in crown fire prone fuel types of Western North America. *Journal of Wildland Fire*, 12(1), 39-50.
- Cruz, M. G., Alexander, M. E., & Wakimoto, R. H. (2004). Modelling the likelihood of crown fire occurrence in conifer forest stands. *Forest Science*, 50(6), 640-658.
- Dimitrakopoulos, A. P., & Papaioannou, K. K. (2001). Flammability assessment of Mediterranean forest fuels. *Fire Technology*, 37(2), 143-152.
- Fosberg, M. A. (1970). Predicting fire behavior: a review. In *Proceedings of the Tall Timbers Fire Ecology Conference* (Vol. 10, pp. 1-16). Tallahassee, FL: Tall Timbers Research Station.
- Fry, D. L., & Stephens, S. L. (2010). The influence of humans and climate on wildfire in California's Sierra Nevada. *The Holocene*, 20(6), 819-828.
- Gould, J. S., Cheney, N. P., & McCaw, L. (2008). *Project Vesta-Fire in Dry Eucalypt Forest: Fuel structure, fuel dynamics and fire behaviour*. Ensis-CSIRO, Canberra, ACT, and Department of Environment and Conservation, Perth, WA.
- Graham, R. T., Lavoie, N., & Stocks, B. J. (2004). Predicting the behavior of crown fires in the boreal forest using a process-based model. *Canadian Journal of Forest Research*, 34(12), 2507-2520.

- Heinsch, M., & Andrews, P. J. (2010). BehavePlus Fire Modeling System. *International Journal of Wildland Fire*, 19(6), 785-796.
- Keane, R. E. (2013). The role of fuel moisture in wildland fire behavior. In J. F. McDonald, J. T. Abatzoglou, & J. A. Westerling (Eds.), *Wildland fire science* (pp. 179-200). Cham, Switzerland: Springer.
- Keane, R. E. (2015). Fuel moisture. In R. E. Keane, E. A. Johnson, & J. A. Taylor (Eds.), *Wildland fire behavior and modeling* (pp. 111-144). Cham, Switzerland: Springer.
- Keyes, C. R., & O'Hara, K. L. (2002). Quantifying stand targets for silvicultural prevention of crown fires. *Western Journal of Applied Forestry*, 17(2), 101-109.
- Lee, S. J., Kwon, C. G., & Kim, S. Y. (2021). The Analysis of Forest Fire Fuel Structure Through the Development of Crown Fuel Vertical Distribution Model: A Case Study on Managed and Unmanaged Stands of *Pinus densiflora* in the Gyeongbuk Province. *The Korean Journal of Forest Science*, 50(3), 294-304.
- López-González, F. (2023). Modelling the spread of crown fire in mixed-conifer forests in Spain. *Forest Ecology and Management*, 463, 118681.
- Mercker, D. W. (2017). Fuels and fire behavior in the wildland-urban interface. In J. F. McDonald, J. T. Abatzoglou, & J. A. Westerling (Eds.), *Wildland fire science* (pp. 155-178). Cham, Switzerland: Springer.
- Pérez, J. L. (2016). Desarrollo de un modelo para la predicción de la propagación de incendios forestales en bosques de pino-encino. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

- Pyne, S. J., & Andrews, P. L. (1996). Fire and the environment. In S. J. Pyne, P. L. Andrews, & R. W. Dennison (Eds.), *Introduction to wildland fire* (pp. 19-48). New York, NY: Wiley.
- Rodríguez, R., & Fulé, P. (2003). A model for predicting fire behavior and crown fire spread in mixed-conifer forests of the southwestern United States. *Canadian Journal of Forest Research*, 33(1), 154-165.
- Rothermel, R. C. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA Forest Service Research Paper INT-115. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.
- Rojas-Ortíz, Gerardo, De Los Santos-Posadas, Héctor M., González-Hernández, Víctor A., Aldrete, Arnulfo, Gómez-Guerrero, Armando, & Fierros-González, Aurelio M. (2012). Modelos de biomasa aérea y foliar en una plantación de pino de rápido crecimiento en Oaxaca. *Madera y bosques*, 18(1), 25-41.
- Taylor, S. W., Brown, J. K., & Keane, R. E. (2021). The effects of fuel moisture and wind on the spread of crown fire in a ponderosa pine forest. *Forest Ecology and Management*, 493, 118681.
- Tewari, V. P., Marai, M. K. M., & Kumar, G. V. S. (2013). Allometry, biomass and productivity of an afro-montane forests in Kenya. *Tropical Ecology*, 54(2), 245-260.
- Van Wagner, C. E. (1967). The dynamics of wildland fuel beds. *Canadian Journal of Forest Research*, 7(3), 165-181.

Capítulo IV. Conclusiones Generales

Los modelos de regresión desarrollados proporcionan estimaciones sólidas del peso seco de los combustibles aéreos a partir de predictores morfológicos no destructivos. Variables como el contenido de humedad de las hojas, la altura del árbol, el número de ramas, el diámetro de la copa y el espesor de la corteza tienen una influencia decisiva en la carga e inflamabilidad de los combustibles aéreos. Los resultados del estudio son útiles para identificar áreas de alto riesgo de incendios forestales y contribuir a una gestión preventiva efectiva en la región de estudio.