



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

**VULNERABILIDAD AL FUEGO EN ÁREAS FORESTALES DEL CAMPO
EXPERIMENTAL LAS CRUCES MEDIANTE UN ANÁLISIS MULTICRITERIO**

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

Presenta:

LILIANA IVETH ROJAS ESTRADA

Bajo la supervisión de: DR. JOSÉ LUIS ROMO LOZANO

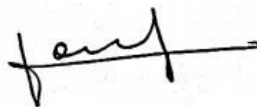


Chapingo, Estado de México, febrero de 2021

VULNERABILIDAD AL FUEGO EN ÁREAS FORESTALES DEL CAMPO EXPERIMENTAL LAS CRUCES MEDIANTE UN ANÁLISIS MULTICRITERIO

Tesis realizada por **LILIANA IVETH ROJAS ESTRADA** 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. JOSÉ LUIS ROMO LOZANO



ASESOR: _____

DR. LEOPOLDO MOHEDANO CABALLERO



ASESOR: _____

DR. ANTONIO VILLANUEVA MORALES

CONTENIDO

CONTENIDO.....	III
LISTA DE CUADROS.....	V
LISTA DE FIGURAS.....	VI
DEDICATORIAS.....	VII
AGRADECIMIENTOS.....	VIII
DATOS BIOGRÁFICOS.....	IX
RESUMEN GENERAL.....	10
GENERAL ABSTRACT	11
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	12
1.1 Antecedentes.....	12
1.2 Justificación.....	14
1.3 Planteamiento del problema	16
1.4 Objetivos	16
1.5 Preguntas de Investigación	17
1.6 Estructura.....	18
1.7 Contenido capitular.....	18
1.8 Literatura citada.....	19
CAPITULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA	21
2.1 Marco teórico conceptual.....	21
2.2 Literatura citada	34
2.3 Marco de referencia.....	38

2.4	Literatura citada	45
CAPITULO 3. SUSCEPTIBILIDAD AL FUEGO EN EL CAMPO FORESTAL EXPERIMENTAL LAS CRUCES, TEXCOCO, MÉXICO: UNA PRIORIZACIÓN BASADA EN EL ENFOQUE MULTICRITERIO.....		
3.1	RESUMEN.....	51
3.2	ABSTRACT	51
3.3	INTRODUCCIÓN.....	52
3.4	MÉTODO.....	54
3.4.1	Área de estudio	54
3.4.2	Identificación de variables de ocurrencia	55
3.4.3	Conformación de la base de datos	57
3.4.4	Determinación de los tipos de vegetación predominantes	57
3.4.5	Selección de sitios de muestreo	58
3.4.6	Recolección de datos	58
3.4.7	Cuantificación de cargas de combustible.....	60
3.4.8	Ponderación de variables	61
3.4.9	Método PROMETHEE II	61
3.5	RESULTADOS	63
3.6	DISCUSIÓN.....	71
3.7	CONCLUSIONES	73
3.8	AGRADECIMIENTOS.....	74
3.9	REFERENCIAS	74

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Variables que potencialmente asociadas con la ocurrencia de incendios forestales	56
Cuadro 2. Matriz de decisión.....	61
Cuadro 3. Desempeño de los sitios en cada criterio	65
Cuadro 4. Flujos unicriterio netos.....	68
Cuadro 5. Flujos globales y priorización de los sitios de menor a mayor susceptibilidad a incendios	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura del documento de titulación	18
Figura 2. Triangulo del fuego.....	22
Figura 3. Etapas de evaluación multicriterio	31
Figura 4. Ubicación del Campo Forestal Experimental las Cruces, Texcoco, México.	55
Figura 5. Diseño de muestreo de los conglomerados para la evaluación de combustibles forestales (Fuente: Elaboración propia).....	59
Figura 6. Los cinco sitios con mayor susceptibilidad a incendios, ordenados de menor a mayor susceptibilidad	71
Figura 7. Los cinco sitios con menor susceptibilidad a incendios, ordenados de menor a mayor susceptibilidad.	72
Figura 8. Susceptibilidad en el Campo Forestal Experimental las Cruces.	73

DEDICATORIAS

A Vale y Ali, su afecto y cariño son los detonantes de mi felicidad, de mi esfuerzo, de mis ganas de buscar lo mejor para ustedes, por inspirarme a ser una mejor persona en todos los sentidos. Gracias por ayudarme a encontrar el lado dulce de la vida, son mi motivación más grande para concluir con éxito este proyecto. Los amo.

A Robert, por recorrer a mi lado este camino llamado vida.

A mis padres, por ser los principales promotores de mis sueños, por creer en cada uno de ellos y apoyarme incondicionalmente para cumplirlos.

Liliana V. Rojas Estrada

AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)**, por la beca otorgada para la realización de estudios de maestría.

A la **Universidad Autónoma Chapingo** y a la **Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales** por permitirme realizar mis estudios de posgrado, así como el uso de sus instalaciones para el desarrollo de la investigación.

Al **Dr. José Luis Romo Lozano** por su tiempo y dedicación para el desarrollo de esta investigación y al resto del comité por las observaciones realizadas.

Al **Dr. Dante Arturo Rodríguez Trejo** por su orientación, tiempo y atinadas observaciones para la mejora de la investigación realizada.

Al **M.C. Javier Santillán Pérez** por sus consejos, apoyo y orientación para recabar la información de campo.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Liliana Iveth Rojas Estrada

Fecha de nacimiento: 21 de agosto de 1991

Lugar de nacimiento: Cd. Nezahualcóyotl, Estado de México

CURP: ROEL910821MMCJSL00

Profesión: Ingeniero en Restauración Forestal

Cedula profesional: 09170423



Desarrollo académico:

Bachillerato: Preparatoria Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo

Licenciatura: División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo.

RESUMEN GENERAL

VULNERABILIDAD AL FUEGO EN ÁREAS FORESTALES DEL CAMPO EXPERIMENTAL LAS CRUCES MEDIANTE UN ANÁLISIS MULTICRITERIO

Vulnerability to fire in forest areas of the experimental field crosses through multicriteria analysis

Los incendios forestales son fenómenos de gran relevancia; ya que pueden afectar prácticamente cualquier ecosistema que provee de bienes y servicios a los seres vivos. Así mismo causan grandes impactos en el ambiente, como son los efectos sobre el cambio climático, situación que acentúa los problemas globales y que atentan la vida sobre el planeta. Los incendios forestales son causados por múltiples variables, sin embargo, al momento no se ha aplicado una metodología que involucre todas estas variables sin presentar limitaciones por el número de variables a utilizar. Es por ello que, en el presente trabajo se hace uso de la metodología PROMETHEE II, con la finalidad de obtener una clasificación de vulnerabilidad al fuego que brinde información sobre las áreas potenciales de presencia de incendios forestales en el Campo Experimental Las Cruces. Se requirió de información levantada en campo, bases de datos, cartográfica y entrevistas a expertos en tema de incendios. Se determinaron los tipos de vegetación predominante mediante SIG; asimismo se calcularon las cargas de combustible forestal disponibles. Posteriormente se estimaron los flujos unicriterio netos para cada sitio y se clasificaron por su grado de vulnerabilidad. Finalmente, se identificaron en un mapa los cinco sitios que resultaron más susceptible a los incendios. Los resultados de este estudio permiten alcanzar apropiadamente los objetivos de priorización de los sitios con base en su susceptibilidad a incendios forestales. Asimismo, amplían las posibilidades de análisis y estudio cercano y puntual del desempeño de los distintos criterios considerados, permitiendo obtener resultados útiles y confiables.

Palabras clave:

Incendios, combustible, toma de decisiones multicriterio, priorización, vulnerabilidad

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

Autor: Liliana Iveth Rojas Estrada

Director de Tesis: Dr. José Luis Romo Lozano

GENERAL ABSTRACT

VULNERABILITY TO FIRE IN FOREST AREAS OF THE EXPERIMENTAL FIELD CROSSES THROUGH MULTICRITERIA ANALYSIS

Forest fires are highly relevant phenomena; they can affect virtually any ecosystem that provides goods and services to living things. They also cause great impacts on the environment, such as the effects on climate change, a situation that accentuates global problems and that threaten life on the planet. Forest fires are caused by multiple variables, however, at the moment a methodology has not been applied that involves all these variables without presenting limitations by the number of variables to be used. That is why, in the present work, the PROMETHEE II methodology is used, with the purpose of obtaining a classification of vulnerability to fire that provides information on the potential areas of presence of forest fires in the Experimental Field Las Cruces. Field surveys, databases, mapping and interviews with fire experts were required. Predominant vegetation types were determined by GIS; available forest fuel loads were also calculated. Net unicriteria flows were then estimated for each site and classified by their degree of vulnerability. Finally, the five sites that were most susceptible to fires were identified on a map. The results of this study allow to properly achieve the objectives of prioritization of the sites based on their susceptibility to forest fires. They also expand the possibilities of close and punctual analysis and study of the performance of the different criteria considered, allowing to obtain useful and reliable results.

Key words:

Fire, fuel, multi-criteria decision making, prioritization, vulnerability

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

Author: Liliana Iveth Rojas Estrada

Advisor: Dr. José Luis Romo Lozano

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Antecedentes

Los ecosistemas forestales son imprescindibles para la vida en el planeta. Forman parte fundamental en la producción y distribución de agua, son purificadores de aire, fuente de producción de oxígeno, regulan la temperatura y humedad con lo que se logra un equilibrio en el clima, fuentes de alimento y hábitat de seres vivos, entre otros beneficios ambientales que obtenemos (Del Ángel Mobarak, 2012).

En gran medida, estos ecosistemas son afectados por diversos fenómenos, entre los que destacan la presencia de plagas y los incendios forestales, estos últimos representan uno de los fenómenos más comunes y extendidos en todo el planeta. En los últimos años se han registrado incendios con un gran impacto en extensas superficies de ecosistemas forestales a nivel mundial, y México no ha sido la excepción. Paulatinamente el territorio nacional se ha visto afectado de manera significativa cada año por estos siniestros, siendo un factor ecológico y uno de los fenómenos más comunes (Valenzuela Urzúa & Cáceres, 2011).

Los incendios forestales son considerados fenómenos hostiles que afectan los recursos forestales, ya que junto con las plagas y enfermedades son causa de mortalidad de un gran número de árboles, convirtiéndose estos a su vez, en factores importantes de la degradación y deforestación. Sin embargo, aunque son considerados una gran amenaza, estos constituyen un factor que ha formado parte de la dinámica de muchos ecosistemas a lo largo del tiempo (Agee, 1996) (Brown & Smith, 2000).

La ocurrencia de estos siniestros no está definida, se pueden presentar en cualquier ecosistema en cualquier época, aunque generalmente se presenta cuando existe un periodo prolongado de sequía, suficiente material combustible y cuando la cubierta vegetal tiene la continuidad necesaria para que el fuego se propague. Por lo tanto, las áreas con altas cargas de combustibles tienen mayor peligro de incendiarse con mayor intensidad (Rodríguez Trejo D. A., La lucha contra el fuego :

guía para la prevención, presupresión y supresión de incendios forestales (No. Sirsi) i9789688842720), 1994).

El peligro de incendio forestal es resultado de factores constantes y variables que afectan el inicio, la propagación y la dificultad de su control entre tales factores destacan: topografía, clima, disponibilidad de carga de combustibles, tipo de vegetación y tiempo atmosférico (Chandler, Cheney, Thomas, Trabau, & Williams, 1983) (Vélez Muñoz, 2009).

Como se mencionó anteriormente, el fuego tiene un papel relevante en la estructura, funcionamiento y dinámica de los ecosistemas terrestres, pero cuando se propaga sin control, contribuye de manera negativa en el ecosistema, teniendo impactos poco favorables como lo es el incremento de bióxido de carbono en la atmósfera y en la deforestación, trayendo consigo posteriores consecuencias como son la erosión de los suelos o el cambio en la estructura y composición de los ecosistemas (Porreo Rodriguez, 2001).

La ocurrencia de los incendios depende de muchas variables, entre ella se encuentran las climáticas (precipitación, altitud, humedad, temperatura y exposición, entre otras), de relieve, tipo de vegetación, cargas de combustible forestal, sin embargo, todas estas dependen de la variabilidad temporal y de los factores antrópicos del sitio (Drury & Veblen, 2008).

Generalmente, años con un elevado grado de humedad dan origen a la formación de una densa cobertura vegetal, que eventualmente es el combustible ideal para la ocurrencia de incendios terrestres de mediana a relativamente alta intensidad en el año seco siguiente. De la misma manera, las áreas con orientación norte y de alta elevación tienen menor riesgo de presencia de incendios, mientras que aquellas con orientación sur y suroeste generalmente son más susceptibles a la presencia de incendios (Fulé & Covington, 1999).

Dada la variabilidad de los incendios forestales, no se pueden determinar exactamente el grado de daño causado, no obstante, se han distinguido tres tipos

de incendios que implican diferentes grados de daño en los ecosistemas: 1) superficiales: donde el fuego consume los combustibles que se encuentran sobre el suelo como hierbas, zacates, leñas, hojarasca, sin quemar todo el cuerpo de los árboles; 2) subterráneos, el fuego quema el mantillo y raíces bajo la superficie del suelo o la materia orgánica acumulada en las fracturas de grandes afloramientos de roca y 3) incendios de copa o corona, en los cuales el fuego consume completamente a los árboles y se propaga tanto de copa en copa como superficialmente; son poco frecuentes en México (Rodríguez Trejo D. A., La lucha contra el fuego : guía para la prevención, presupresión y supresión de incendios forestales (No. Sirsi) i9789688842720), 1994).

Los estudios que se han realizado sobre los incendios forestales en México, abarcan distintos enfoques, los cuales básicamente contemplan tres aspectos: 1) los efectos del fuego en los ecosistemas forestales, 2) las actividades de prevención y combate divididas en las operativas y 3) el desarrollo de índices de comportamiento y riesgo de incendios, y el uso del fuego como herramienta silvícola y pastoril. El manejo del fuego comprende al menos los dos últimos aspectos, lo cual implica indagar aun sobre las interrelaciones entre los combustibles, el ambiente y el fuego (Rodríguez Trejo D. , 1996).

1.2 Justificación

La construcción de modelos para evaluar situaciones reales de vulnerabilidad y riesgo requiere considerar, además de los elementos necesarios para la combustión, la historia ambiental del lugar y el tipo de manejo al que están sometidos los ecosistemas, de ahí que el componente social resulta ser muy importante, sin embargo, generalmente no ha sido incluido de tal manera que se refleje realmente el grado en que este influye en dicho proceso (Pérez Verdín, Marquez Linares, Cortés Ortiz , & Salmerón Macías, 2013).

Mediante el uso de técnicas multicriterio, se puede llevar a cabo el desarrollo de estimaciones de riesgo a incendios forestales. Estas metodologías netamente

consisten en la selección de variables partiendo de una previa revisión de bibliografía, para posteriormente el desarrollo de un modelo ponderado en un ambiente SIG. Sin embargo, en las evaluaciones multicriterio mediante un SIG, generalmente se presentan problemas en el uso de correcto de estas, esto dado el amplio número de variables y alternativas existentes, lo cual, a su vez, dificulta el empleo de técnicas cuyas reglas de decisión no son capaces de comparar entre sí todas las alternativas en un período de tiempo razonable (Bosque Sendra, Díaz Castillo, & Díaz Muñoz, 2001).

Como ejemplos de las técnicas multicriterio aplicadas en los SIG para la construcción de índices de riesgo de incendios, se encuentra el Método de las Jerarquías Analíticas (MJA) y la Técnica para el Orden de las Preferencias por Similitud a la Solución Ideal (TOPSIS). Aunque ambas metodologías consideran un número elevado de variables, “cuando el número de alternativas es muy elevado, estos procedimientos se topan con el mismo problema que la aplicación multicriterio en SIG (Pacheco & Contreras, 2008).

Es por ello que se plantea la utilización de la Técnica Sourting, esta técnica “no plantea limitaciones en relación al número de alternativas a evaluar ni al número de criterios a ser considerados”, de ahí que el resultado de esta técnica nos generara la “mejor alternativa” sin necesidad de tener un límite de opciones y tiempo; lo cual finalmente le confiere excelentes posibilidades para una mejor toma de decisión.

El identificar las áreas vulnerables en la zona del campo experimental las Cruces, implica gran cantidad de variables, las cuales a su vez son específicas al área. Aun cuando existe como herramienta el Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales para México, con este programa no se puede determinar la vulnerabilidad de las áreas específicas para una zona, dado que se encuentra calibrado con valores nacionales, es por esto, que se plantea la utilización de la técnica sourting con la finalidad de utilizar el mayor número de variables que influyen en la presencia de incendios en el área de estudios, obteniendo de esta manera un resultado más preciso del grado de vulnerabilidad existente en el área de las

Cruces. Lo cual finalmente permitirá diseñar y establecer acciones y programas para reducir y mitigar estos riesgos antes de la ocurrencia de estos fenómenos, a través del reforzamiento y adecuación de las medidas de manejo implementadas en esta área.

1.3 Planteamiento del problema

El presente trabajo se enfoca en la determinación de las áreas susceptibles a incendios forestales en el área del Campo Experimental Las Cruces. Para esto, se identificaron los siniestros presentes durante el periodo 2008-2018, así mismo se realizó la caracterización de los disturbios que han afectado en este periodo. Para su estudio se incorporan parámetros como la frecuencia o número de disturbios que se han presentado; la superficie afectada, tiempo necesario para que un área se afecte nuevamente por el mismo siniestro; la estacionalidad o época del año en la que se producen los disturbios; intensidad, la severidad, grado de afectación en el ecosistema. De esta manera, una vez que se obtenga el conocimiento del grado de vulnerabilidad de las áreas a incendios forestales, se contribuya en la planeación de estrategias de manejo del fuego, tales como prevención, control y combate del mismo, garantizando que los recursos serán dirigidos de manera eficaz a las zonas con mayor probabilidad de incendio.

1.4 Objetivos

General

Obtener una clasificación de vulnerabilidad al fuego que brinde información sobre las áreas potenciales de presencia de incendios forestales, para fortalecer la toma de decisiones y estrategias como prevención y manejo del fuego en el Campo Experimental Las Cruces mediante la aplicación de un análisis multicriterio.

Específicos

Identificar las variables meteorológicas, de relieve y sociales que influyen en la ocurrencia de incendios, para determinar los patrones de distribución de los incendios en el Campo Experimental Las Cruces, mediante la revisión de base de datos, mediciones en campo y entrevistas a expertos en el tema.

Determinación de las cargas de combustible de los tipos de vegetación predominantes en la estación experimental las cruces, mediante el levantamiento de datos en campo y la aplicación de la técnica de intersecciones planares para determinar el grado de vulnerabilidad de las áreas por combustible forestal existente.

Elaboración de los perfiles de condición a vulnerabilidad de las áreas forestales mediante la aplicación del método multicriterio para la clasificación de las áreas propensas a incendios forestales.

1.5 Preguntas de Investigación

¿Cuáles son las variables que determinan la presencia de incendios forestales?

¿Qué tipo de variables (climatológicas, topográficas, susceptibilidad de la vegetación y/o antrópicas influyen mayormente en la presencia de incendios forestales?

¿Qué áreas por tipo de vegetación predominante de la Estación Experimental las Cruces son mayormente susceptibles a la presencia de incendios forestales?

¿La metodología PROMETHEE II es apropiada para lograr la priorización de áreas vulnerables, de acuerdo a su grado de vulnerabilidad?

1.6 Estructura

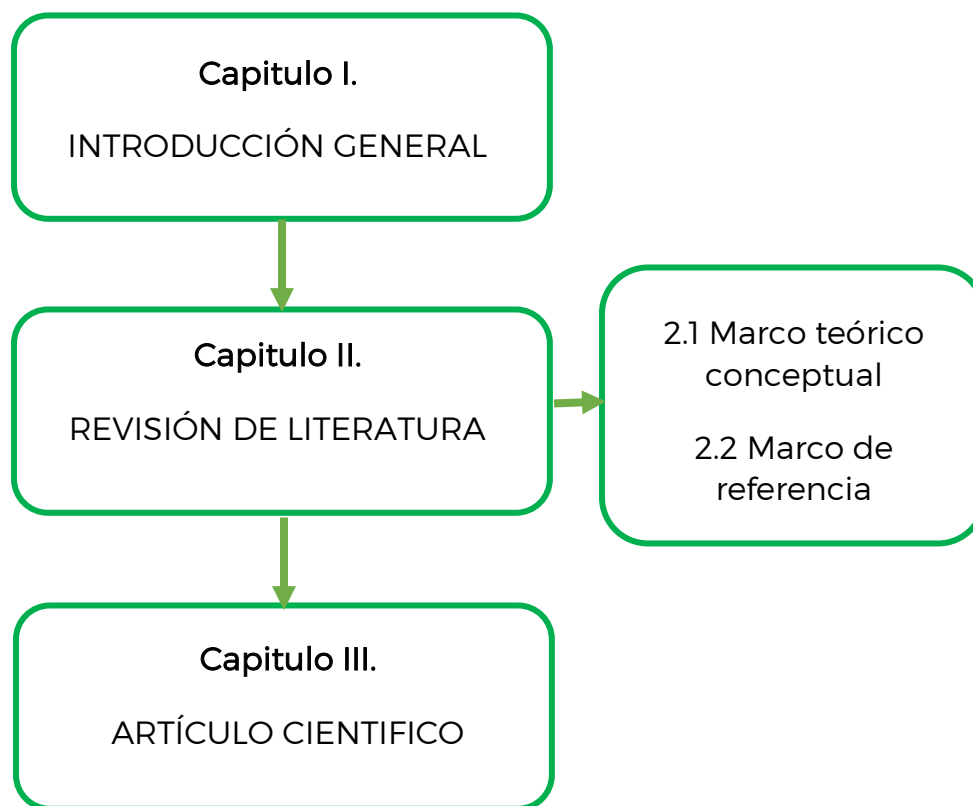


Figura 1. Estructura del documento de titulación

1.7 Contenido capitular

El presente documento se dividió en tres capítulos. El primer capítulo consta de la justificación de la investigación, la descripción del mismo y el desglose de los objetivos general y específicos del trabajo. El segundo capítulo se encuentra conformado por el marco teórico del tema en cuestión, en el que se abordan los principales conceptos base de la investigación; así mismo este capítulo se hace conforma de un marco de referencia. Mientras que el tercer capítulo está conformado por un artículo científico, producto de esta investigación.

1.8 Literatura citada

- Agee, J. (1996). *Fire ecology of Pacific Northwest forests*. Washington D. C.: Island press.
- Bosque Sendra, J., Diaz Castillo, C., & Díaz Muñoz, M. (2001). De la justicia espacial a la justicia ambiental en la política de localización de instalaciones para la gestión de residuos en la Comunidad de Madrid. *Boletín de la Real Sociedad Geográfica* 137, 89-114.
- Brown, J. K., & Smith, J. K. (2000). *Wildland fire in ecosystems: effects of fire on flora* 2. U.T. U.S.: Rocky Mountain Research Station.
- Chandler, C., Cheney, P., Thomas, P., Trabau, L., & Williams, D. (1983). *Fire in forestry Volume 1. Forest fire behavior and effects. Volume 2. Forest fire management and organization*. New York, EU: John Wiley & Sons, Inc.
- Del Ángel Mobarak, G. A. (2012). *La Comisión Nacional Forestal en la historia y el futuro de la política forestal de México (No. 333.7516 C64)*. México, D.F.: Comisión Nacional Forestal.
- Drury, S., & Veblen, T. (2008). Spatial and temporal variability in fire occurrence within the Las Bayas Forestry Reserve, Durango, Mexico. *Plant Ecology* 197(2), 299-316.
- Fulé, P., & Covington, W. W. (1999). Fire REgime Changes in La Michilia Biosphere Reserve, Durango, México. *Conservation Biology* 13(3), 640-652.
- Pacheco, J. F., & Contreras, E. (2008). *Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos*. Santiago de Chile: Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES).
- Pérez Verdín, G., Marquez Linares, M., Cortés Ortiz, A., & Salmerón Macías, M. (2013). Análisis espacio-temporal de la ocurrencia de incendios forestales en Durango, México. *Madera y bosques* 19(2), 37-58.

- Porreo Rodríguez, M. Á. (2001). *Incendios forestales, investigación de causas*. Madrid, España: Mundi-Prensa.
- Rodríguez Trejo, D. (1996). *Incendios Forestales*. Universidad Autonoma Chapingo, México: Multi-Prensa.
- Rodríguez Trejo, D. A. (1994). *La lucha contra el fuego : guía para la prevención, presupresión y supresión de incendios forestales (No. Sirsi) i9789688842720*. México : Universidad Autónoma Chapingo, Dirección de Difusión Cultural, División de Ciencias Forestales : SARH, Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre.
- Rodríguez Trejo, D. A. (2003). Fire ecology of Mexican pines and a fire management proposal. *International Journal of Wildland Fire*, 12(1), 23-37.
- Valenzuela Urzúa, N., & Cáceres, F. (2011). Incendios forestales: principales consecuencias económicas y ambientales en Chile. *RIAT Revista Interamericana de Ambiente y Turismo* 7(1), 18-24.
- Vélez Muñoz, R. (2009). *La defensa contra incendios forestales: fundamentos y experiencias (No. Sirsi) i9788448127428*. McGraw-Hill.

CAPITULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Marco teórico conceptual

Con el propósito de definir una base conceptual para abordar la vulnerabilidad a incendios forestales y su problemática ambiental, se analizan algunos conceptos teóricos que se abordan en esta investigación, para ello se consultó diferentes documentos científicos referidos al tema. El abordaje conceptual por su misma naturaleza está sujeto a interpretaciones y construcciones teóricas disciplinarias lo cual permite establecer una postura inicial para una posterior discusión de los resultados.

Ecosistema forestal

Los ecosistemas forestales son áreas de paisaje dominado por árboles, los cuales en conjunto conforman comunidades biológicamente integradas de plantas, animales y microbios; los cuales interactúan con el suelo y atmósfera (Boyce & Haney, 1997). Este conjunto de poblaciones, tiene características particulares como es la variedad en edad, especies, composición, estructura y función. El desorden periódico es un atributo clave de la mayoría de los ecosistemas y el mantenimiento de su carácter y valores históricos generalmente requieren el mantenimiento de los regímenes históricos de desórdenes o los efectos ecológicos que de ellos resultan. De esta manera, el bosque es considerado como un ecosistema complejo, que radica especialmente en árboles que atenúan la tierra y mantienen una gran cantidad de formas de vida. Así mismo, conforman un entorno específico, que coayuda a la existencia de otras plantas, animales, bacterias, entre otros (Kimmins, 2003).

Fuego

Díaz (2015) menciona que el fuego es una reacción química conocida como combustión, la cual consiste en una oxidación rápida del material combustible con

desprendimiento de energía en forma de luz, calor y gases. Se necesitan tres elementos para que exista el fuego:

- **Oxígeno.** Para mantener una combustión necesitamos como mínimo 16% de oxígeno. Algunas sustancias oxidantes como el nitrato de amonio tienen suficiente oxígeno en su composición química como para mantener la combustión en atmósferas deficientes de oxígeno.
- **Calor.** Es la energía requerida para elevar la temperatura del combustible hasta el punto en que se despidan suficientes vapores que permiten que ocurra la ignición. Es el elemento que activa la combustión.
- **Combustión.** La combustión es una reacción de oxidación entre un cuerpo combustible y un cuerpo comburente (generalmente oxígeno), provocada por una fuente de energía, normalmente en forma de calor. Esta reacción es exotérmica. Cuando el combustible se combina totalmente con el oxígeno sin dejar más productos residuales que CO₂ y vapor de agua, recibe el nombre de combustión completa. Si el combustible no se combina totalmente con el oxígeno por ser insuficiente la cantidad de oxígeno en el ambiente, recibe el nombre de combustión incompleta, desprendiendo monóxido de carbono (CO). En conjunto son conocidos como el triángulo del fuego.

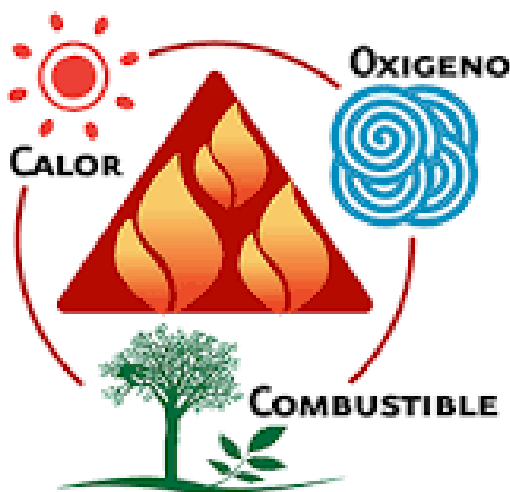


Figura 2. Triángulo del fuego.

Fuente: http://siga.jalisco.gob.mx/incendiosforestales/prevencion_contenido.htm

Incendio

De acuerdo con UNAM (2020), el fuego de grandes proporciones que se desarrolla sin control, el cual puede presentarse de manera instantánea o gradual, pudiendo provocar daños materiales, interrupción de los procesos de producción, pérdida de vidas humanas y afectación al ambiente. Es la oxidación rápida de los materiales combustibles con desprendimiento de luz y calor y la generación de gases y humos. Según el comportamiento de los diversos materiales combustibles, se ha normalizado su agrupación en las siguientes clases de fuego:

- **Fuego Clase A:** es aquel que se presenta en material combustible sólido, generalmente de naturaleza orgánica, y cuya combustión se realiza normalmente con formación de brasas.
- **Fuego Clase B:** es aquel que se presenta en líquidos y gases combustibles e inflamables. Se incluyen en este grupo aquellos materiales que, aun siendo sólidos a la temperatura normal, se licuan antes de llegar a la temperatura de ignición, como asfaltos, parafinas, algunos tipos de polímeros.
- **Fuego Clase C:** Son los producidos por sustancias gaseosas.
- **Fuego Clase D:** es aquel en el que intervienen metales combustibles. Su extinción debe tratarse de forma especial. Por ejemplo, magnesio, aluminio en polvo, sodio, potasio, etc.

Combustible forestal

El combustible forestal está constituido por materiales leñosos y ligeros, vivos o muertos, es decir, toda la materia vegetal presente en un ecosistema que posee la capacidad de encenderse y arder al ser expuesto a una fuente de calor, estos son resultado del proceso natural de caída de hojas, acículas, ramas y humus; aunque también se debe a las actividades antrópicas (Álvaro, 2020). Estos combustibles están presentes en la mayoría de los ecosistemas terrestres, su importancia radica en que son uno de los principales elementos que determinan el establecimiento y

desarrollo de un incendio forestal además en la dificultad para combatirlos (Álvarez Sanchez & Harmon, 2003).

Carga de combustible forestal

La carga de combustible es el peso del combustible existente en el terreno, se expresa en ton/ha y se refiere a peso seco. La carga de material muerto en el terreno se estima a partir de técnicas de muestro siendo la más difundida la metodología desarrollada por Brown en 1982 (Muñoz Robles, Treviño Garza, Verástegui Chávez, Jiménez Pérez, & Aguirre Calderón, 2005). En los ecosistemas forestales se definen dos tipos de carga:

- **Carga de combustibles total:** está constituida por todo el material combustible, desde la materia orgánica del suelo hasta todos los árboles. Es la máxima cantidad de combustible que se podría quemar en condiciones extremas, en un incendio de alta intensidad (Ruíz González, 2004).
- **Carga de combustibles disponible:** es la que realmente está en condiciones de arder y consumirse bajo las condiciones ambientales del momento. Será siempre de valor inferior al de la carga total.

La carga de combustible es un elemento que se puede modificar mediante la aplicación de prácticas silvícolas preventivas como: podas, aclareos y cortas; extracción de material muerto, quemas controladas y/o pastoreo.

Incendio forestal

Es la propagación libre del fuego sobre la vegetación forestal, ya sea por causas naturales o inducidas, con una ocurrencia y propagación no controlada o programada (Rodríguez Trejo D. , 1996). Estos siniestros representan costos económicos (combate), generan daños a la salud de las personas, contribuyen a la emisión de partículas a la atmósfera, incrementan la pérdida de recursos forestales maderables y no maderables, así mismo incrementa la posibilidad de accidentes para las brigadas combatientes, aumenta los costos de restauración de los ecosistemas e impactan de manera negativa en la calidad de los servicios

ambientales ofrecidos por los bosques (producción de agua, conservación de suelos, producción de oxígeno y belleza escénica).

El grado de impacto de los incendios forestales depende de varios factores, sin embargo, el combustible es el factor principal que determina la magnitud del mismo. A su vez, el tipo de incendio define fuertemente el grado de daño o beneficio que estos pueden provocar.

De acuerdo con Ruiz y Blanco (2004) los incendios forestales se clasifican en tres tipos:

- **Incendios superficiales:** es el tipo de incendio más común en México; el fuego se propaga en forma horizontal sobre la superficie del terreno, afectando combustibles vivos y muertos; como pastizales, ramas, arbustos o pequeños árboles, troncos, humus, entre otros que se encuentran desde la superficie del suelo y hasta 1.5 metros de altura.
- **Incendios de copa o aéreos:** Este es el tipo de incendio es el más peligroso ya que poco se puede hacerse para su control. Este se propaga a través de la copa de los árboles y por la intensidad del fuego que propicia, llega a dañar muy severamente al ecosistema. Esto último puede significar la pérdida total de toda condición de vida en un área determinada. La posibilidad de que ocurra un incendio de copa más o menos violento dependerá de las condiciones meteorológicas la topografía, así como la posición relativa del combustible en los diferentes estratos, de la cantidad y disposición del combustible aéreo y del porcentaje del combustible seco y fino que presenten las copas.
- **Incendios subterráneos:** inician de forma superficial, bajo el suelo mineral debido a la acumulación y compactación de los combustibles. Por lo general, no producen llama y emiten poco humo. Esto los hace muy peligrosos ya que pueden llegar a áreas con fuerte acumulación de materia seca y provocar un incendio de mayores dimensiones, a pesar de

no ser muy comunes (menos de 2%), cuando se presentan son peligrosos y difíciles de controlar.

Comportamiento del fuego

Se define como la forma en que avanza el fuego en cuanto a su velocidad, intensidad, tasa de crecimiento perimetral y de área, su configuración y la altura promedio que alcanzan las llamas, así como el tipo de incendio: superficial, aéreo o subterráneo (Díaz García, 2015). El comportamiento de todo incendio forestal está gobernado por tres factores: a) el complejo de combustibles existentes en el lugar del siniestro, b) la topografía del terreno y c) las características del tiempo atmosférico prevaleciente (Rodríguez Trejo, Rodríguez Aguilar, & Fernández Sánchez, 2002).

Problemas ambientales causados por los incendios forestales

Un problema ambiental se define como una situación o configuración de factores que amenaza el bienestar humano o la integridad del ecosistema, y que es percibida como tal por la sociedad o una parte de ella. En el caso de los incendios forestales estos causan problemas en los diferentes ecosistemas, algunos de ellos de difíciles de recuperar ya que el medio no siempre está en condiciones para recuperarse. Las áreas quemadas pierden calidad del suelo, lo que dificulta la regeneración de las especies establecidas ya que se afecta los primeros horizontes edáficos y se destruyen los componentes orgánicos, haciéndolos más solubles en agua. El efecto más visible después de un incendio es el arrastre de cenizas que ocurren tras las primeras lluvias, esas cenizas son parte del suelo que es arrastrado por erosión superficial hasta los diferentes drenajes de una cuenca (Mascaraque Sillero, 2003).

Un efecto inmediato de los incendios es la producción, liberación de gases y partículas a la atmósfera que resultan de la combustión de biomasa. Después del vapor de agua, el dióxido de carbono es el gas invernadero más importante, estimándose que su concentración está aumentando a una tasa anual promedio de

0,5%. Según Castillo (2003), los gases liberados contribuyen al calentamiento global, desencadenando en forma gradual un cambio climático a nivel planetario. No obstante, en la actualidad las emisiones de dióxido de carbono proveniente de los incendios y quemas forestales es de un 25 % del total de este gas emitido en el mundo. Otro problema generado por los incendios forestales es las pérdidas de especies de flora y fauna, algunas de ellas en vías de extinción, por ello la prevención es inminente.

Ecología del fuego.

Diversos autores señalan que el fuego forma parte de los ecosistemas forestales, sin embargo, esto aplica solo cuando el fuego no es demasiado severo que cause la destrucción del ecosistema afectado

La alta acumulación de combustibles forestales, aunado a la ocurrencia de condiciones atmosféricas adversas, como son las altas temperaturas, distribución de los combustibles en continuidad horizontal y vertical y las actividades antrópicas, propician la presencia de incendios de alta intensidad (Rodríguez Trejo D. , 1996).

Impacto ecológico del fuego.

El fuego tiene una alta influencia sobre los ecosistemas vegetales, cuando se presenta en los ecosistemas, interrumpe el ciclo de la sucesión vegetal, dejando que la vegetación tolerante al fuego permanezca en un sitio específico (Arno, 1980). Los principales aspectos de los ecosistemas afectados por el fuego son:

Características físicas y químicas del suelo. El efecto que el fuego causa depende de su intensidad, lo cual es reflejada en la presencia de altas temperaturas. De manera general, en cuanto a las propiedades físicas, es muy poco o nulo probable que el fuego altere características como la textura, o la permeabilidad (Aguirre, 1981); sin embargo, de forma indirecta al eliminarse la capa vegetal que protege al suelo, es susceptible a erosión lo cual se reflejaría en la pérdida de suelo.

En cuanto al efecto del fuego causado sobre las propiedades químicas del suelo varían dependiendo del tipo de suelo, de manera general el fuego produce incrementos de las cantidades minerales disponibles, se disminuye la acidez del suelo, se incrementa la saturación de las bases y se disminuye el abastecimiento de nitrógeno total (Kimmins, 1974).

Acumulación del material combustible. Este material puede acumularse durante varios años, hasta que se presenta un incendio el cual elimina la capa de combustible original (Arno, 1980). Posterior a este proceso, la acumulación de materia seca se reanuda después del incendio. El tipo de combustible como la cantidad que se encuentra acumulado, definen la intensidad del incendio, lo cual a su vez definirá en impacto en los ecosistemas (Anderson, 1981).

Efecto del fuego sobre organismos del suelo. Los efectos del fuego sobre la fauna y la flora presente en el suelo son altamente variables, dependiendo de la intensidad del incendio, lo profundo que llegue bajo la superficie, el tipo de vegetación y la naturaleza del suelo y del material combustible quemado (Capulín Grande, 2010).

Adaptaciones de las especies forestales al fuego. De acuerdo con Moravec (1990), la selección natural favorece a plantas con características que le permitan evitar o restringir el fuego. Cuando el incendio ocurre solamente una vez en la vida de la planta, dichas adaptaciones le permiten reproducirse rápidamente más que resistir el fuego; en cambio cuando el fuego ocurre en forma continua las adaptaciones de las plantas son distintas, como: corteza gruesa, frutos seróticos, agresividad en la regeneración, floración temprana, entre otras. Estas características ayudan a que las plantas puedan resistir el calor generado en un incendio, o el establecimiento rápido de nuevas generaciones; todo esto es con la finalidad de prevenir los daños que ocasiona el fuego, recuperarse de los daños producidos por el fuego y/o colonizar áreas afectadas por estos siniestros.

Dependencia de los ecosistemas forestales al fuego. Se dice que un ecosistema es dependiente del fuego cuando la continuidad de su existencia está basada en el periodo de ocurrencia de incendios forestales. Gran cantidad de especies están adaptadas a los efectos del fuego e incluso algunas de ellas dependen de él para germinar y crecer (Brown & Smith, 2000). Esta dependencia del fuego incluso ha definido que ciertas especies promuevan la ocurrencia de incendios para lo cual propician condiciones que incrementan la probabilidad de la ocurrencia de estos.

Beneficios ecológicos de los incendios forestales

En la ecología del fuego los incendios forestales no son innatamente destructivos o constructivos, estos simplemente causan cambios. El que estos cambios se vean como deseables o no, dependen de su compatibilidad con el equilibrio ecológico de los ecosistemas o desde un punto de vista de uso del recurso forestal con ciertos objetivos de manejo. Sin embargo, estos cambios son biológicamente necesarios para mantener la salud de ciertos ecosistemas.

Amenaza

Peligro latente que representa la posible manifestación de un fenómeno particular (en este caso, un incendio de la cobertura vegetal), de origen natural, socio-natural o antropogénico, en un territorio particular, que puede producir efectos adversos en las personas, la producción, la infraestructura, los bienes y servicios y el ambiente. Es un factor de riesgo sobre un elemento o grupo de elementos expuestos (vegetación), que se expresa como la probabilidad de que un evento (incendio) se presente con una cierta intensidad, en un sitio específico y en un tiempo definido (Ruiz & Blanco , 2004).

Vulnerabilidad

Predisposición de un elemento a ser afectado, a sufrir daño y de encontrar dificultad de recuperarse. Corresponde a la probabilidad de afectación física, económica,

política o social que tiene una comunidad o un grupo de elementos de sufrir efectos adversos en el caso de que se presente un fenómeno peligroso de origen natural o antrópico. La propuesta interpreta la vulnerabilidad ante un incendio de la cobertura vegetal a partir de la población, los valores de protección de infraestructuras e instalaciones, las actividades económicas, el patrimonio natural, histórico y cultural y la acción institucional, así como algunos aspectos territoriales y ecosistémicos (Ruiz & Blanco , 2004).

Evaluación multicriterio

Conforme con Pietersen (2006), el objetivo principal de la evaluación multicriterio es auxiliar al decisor a escoger la mejor alternativa entre un rango de alternativas en un entorno de criterios en competencia y conflicto, dichos objetivos pueden ser económicos, ambientales, sociales, institucionales, técnicos y estéticos.

La metodología multicriterio descompone un problema complejo en partes más simples, de esta manera el decisor puede estructurar un problema con múltiples criterios en forma visual, mediante la construcción de un modelo jerárquico que básicamente contiene tres niveles: meta u objetivo, criterios y alternativas, jugando un papel vital como herramienta de planeación (Munda, Nijkamp, & Rietveld, 1994).

De acuerdo con Chakhar (2003), una gran mayoría de técnicas de evaluación multicriterio constan de las siguientes etapas: 1) diseño de una matriz con los criterios y las alternativas definidos; 2) agregación de las distintas puntuaciones de los criterios (ponderación de variables) mediante algún procedimiento de agregación específico, tomando en cuenta la preferencia de los decisores expresada en término de pesos que se asignan a los diferentes criterios; ese procedimiento o técnica permite al decisor comparar entre las diferentes alternativas con base a los pesos asignados.

Munda, (1994) menciona que la evaluación multicriterio considera factores de tipo cualitativo y cuantitativo; a su vez considera la pluralidad de percepciones de los

actores involucrados en el problema de decisión, la cual debe ser participativa para tomar decisiones y trazar alternativas para la solución de conflictos (Grajales Quintero, Serrano Moya, & HAHN, 2013).



Figura 3. Etapas de evaluación multicriterio

Fuente: [https://www.ecured.cu/An%C3%A1lisis multicriterio](https://www.ecured.cu/An%C3%A1lisis_multicriterio)

Técnicas de evaluación multicriterio

Las metodologías comprendidas en lo que se conoce como análisis de las decisiones multicriterio (MCDA, por sus siglas en inglés), se definen como métodos y procedimientos mediante los cuales se incorporan a la toma de decisiones criterios múltiples y en conflicto. Estas incluyen desde problemas muy simples como el decidir comprar algún satisfactor, hasta problemas muy complicados que pueden afectar a una nación entera (Lu & Ruan, 2007).

La literatura sobre la metodología multicriterio la clasifica en dos técnicas principales: continua y discreta. En la primera, un número finito de restricciones en forma de funciones define un número infinito de alternativas factibles. Estos métodos son llamados métodos continuos de optimización en la toma de decisiones multicriterio. La segunda técnica agrupa metodologías que ayudan a la toma de decisiones en escenarios donde las posibles alternativas son evaluadas en múltiples criterios en conflicto. Los expertos llaman a estos métodos discretos,

métodos de toma de decisiones multicriterio (MCDM, por sus siglas en inglés) o métodos de análisis multicriterio (MCDA) (Ceballos, Lamata, & Pelta, 2016).

También existen distintas clasificaciones dentro de los métodos discretos de toma de decisiones. Ishizaka and Nemery (2013), por ejemplo, los agrupa en tres enfoques: agregación completa; outranking (preferencia); metas de aspiración o niveles de referencia. El primero de estos, también conocido como Escuela Americana, asume las evaluaciones como compensables y las sintetiza en una calificación global. En el enfoque Outranking, también conocido como enfoque de la escuela francesa, en la cual las evaluaciones son asumidas como no compensable y el ordenamiento de las opciones puede ser parcial debido a que se permite incomparabilidad. En el enfoque aspiracional se define una meta en cada criterio luego se identifica la opción más cercana a la ideal o al nivel de referencia. Otras clasificaciones pueden ser consultadas en (Wang , Jing, Zhang, & Zhao, 2009) y (Mardani, Jusoh, & Zavadskas, 2015).

Métodos de análisis multicriterio.

De acuerdo con Simon (1947, 1955, 1978, 1983 y 2005) y Thaler (1986) “los problemas en los que las alternativas de decisión son finitas se denominan problemas de decisión multicriterio discretos. Por otro lado, cuando el problema toma un número infinito de valores y conduce a un número infinito de alternativas posibles, se llama decisión multiobjetivo”. En cuanto a los métodos de decisión multicriterio tipo discretos son los siguientes:

- **Ponderación Lineal (scoring):** este método es el más conocido y probablemente el más utilizado para metodologías de decisión multicriterio. Este método permite abordar situaciones de incertidumbre o con escaso nivel de información. Se obtiene una puntuación global mediante la suma de las contribuciones obtenidas en cada uno de los atributos; para realizar esta suma de valores se requiere de un proceso previo de normalización de los atributos (Berumen & Redondo, 2007).

- **Utilidad Multiatributo (MAUT):** los MAUT se basan en estimar una función parcial para cada atributo, de acuerdo con las preferencias de los tomadores de decisiones, que se agregan en una función MAUT en forma aditiva o multiplicativa. Una vez que se determina la utilidad de cada una de las alternativas se consigue una ordenación completa del conjunto finito de alternativas. Utiliza “escalas de intervalo”, y acepta el principio de “preservación de orden” (rank preservation) (Ross, 2005).
- **Relaciones de Superación:** Estos métodos usan como mecanismo básico las comparaciones dos a dos de las alternativas, criterio por criterio. De esta forma puede construirse un coeficiente de concordancia C_k asociado con cada par de alternativas (a_i, a_k) . Existen dos métodos de la escuela francesa: ELECTRE y PROMETHEE. El método ELECTRE (Elimination Et Choix Traduisant la Réalité) tiene varias versiones que usan pseudocriterios y la teoría de conjuntos difusos. El método PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) se ha aplicado, con predicción para problemas de ubicación (Berumen & Redondo, 2007).
- **Proceso Analítico Jerárquico (AHP- The Analytic Hierarchy Process):** fue desarrollado por el matemático Thomas Saaty en 1980 y trata de un lógico y estructurado método de trabajo que optimiza la toma de decisiones complejas cuando existen múltiples criterios o atributos, mediante la descomposición del problema en una estructura jerárquica. El propósito del método es permitir que el agente decisor pueda estructurar un problema multicriterio en forma visual, mediante la construcción de un modelo que básicamente contiene tres niveles: meta u objetivo, criterios y alternativas. Una vez construido el Modelo Jerárquico, se realizan comparaciones por pares entre dichos elementos (criterios-subcriterios y alternativas) y se atribuyen valores numéricos a los juicios dados por las personas, logrando medir cómo contribuye cada elemento de la jerarquía al nivel inmediatamente superior del cual se desprende. Una vez obtenido el resultado final, el AHP permite llevar a cabo el análisis de sensibilidad del modelo (Berumen & Redondo, 2007).

2.2 Literatura citada

- Aguirre, B. (1981). *Efecto del Fuego Sobre Algunas Propiedades Físicas de Suelos Forestales*. Publicación especial, departamento de enseñanza, investigación y servicio en bosques. U.A.CH. Chapingo México. 73 pp.
- Anderson, H. E. (1981). *Aids to determining fuel models for estimating fire behavior* (Vol. 122). US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.
- Álvarez-Sánchez, J., & Harmon, M. E. (2003). *Descomposición de hojarasca: hojas y madera*. Ecología del suelo en la selva tropical húmeda de México, 108-122.
- Álvaro, M. S. (2003). *Índices de causalidad y riesgo de incendios aplicados a los espacios naturales protegidos de la comunidad de Madrid*. Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de http://oa.upm.es/911/1/PFC_Riesgos_Incendios_Forestales.pdf.
- Arno, S. F. (1980). *Forest fire history in the northern Rockies*. Journal of Forestry, 78(8), 460-465.
- Berumen, S. A., & Redondo, F. L. (2007). La utilidad de los métodos de decisión multicriterio (como el AHP) en un entorno de competitividad creciente. *Cuadernos de administración*, 20 (34), 65-87.
- Boyce, M. S., & Haney, A. W. (Eds.). (1997). *Ecosystem management: applications for sustainable forest and wildlife resources*. Yale University Press.
- Brown, J. K., Smith, J. K., & Lyon, L. J. (2000). *Wildland fire in ecosystems: effects of fire on flora* (Vol. 2, No. 42). US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Castillo M., Pedernera, P., Peña, E. (2003). *Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global*. Revista Ambiente y Desarrollo de CIPMA. Vol. XIX / Nº 3

- y 4 / 2003. Disponible en http://www.cipma.cl/RAD/2003/3-4_Castillo.pdf consultado el 06 de noviembre de 2019.
- Capulín Grande, J., Mohedano Caballero, L., & Razo Zarate, R. (2010). *Cambios en el suelo y vegetación de un bosque de pino afectado por incendio*. Terra Latinoamericana, 28(1), 79-87.
- Ceballos, B., Lamata, M. T., & Pelta, D. A. (2016). *A comparative analysis of multi-criteria decision-making methods*. Progress in Artificial Intelligence, 5(4), 315-322.
- Chakhar, S., & Martel, J. M. (2003). *Enhancing geographical information systems capabilities with multi-criteria evaluation functions*. Journal of geographic information and decision analysis, 7(2), 47-71.
- Díaz García, E. R. E. (2015). *Construcción de mapas de combustible forestal para detectar el peligro de incendio en un bosque de pino-encino* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- Grajales-Quintero, A., Serrano-Moya, E. D., & HAHN VON-H, C. M. (2013). *Los métodos y procesos multicriterio para la evaluación*. Luna Azul, (36), 285-306.
- Ishizaka, A., & Nemery, P. (2013). *Multi-criteria decision analysis: methods and software*. John Wiley & Sons.
- Kimmins, J. P. (1974). *Sustained yield, timber mining, and the concept of ecological rotation; a British Columbian view*. The Forestry Chronicle, 50(1), 27-31.
- Kimmins, J. P. (2003). *Ordenación del Ecosistema Forestal: una necesidad del medio ambiente. Pero, ¿Se trata de una realidad práctica o simplemente de un ideal eco-utópico?*.
- Lu, J., & Ruan, D. (2007). *Multi-objective group decision making: methods, software and applications with fuzzy set techniques* (Vol. 6). Imperial College Press.

- Mardani, A., Jusoh, A., & Zavadskas, E. K. (2015). *Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications—Two decades review from 1994 to 2014*. Expert systems with Applications, 42(8), 4126-4148.
- Mascaraque Sillero, Á. (2003). Índices de causalidad y riesgo de incendios forestales aplicados a los espacios naturales protegidos de la Comunidad de Madrid.
- Moravec, J. (1990). *Regeneration of NW African Pinus halepensis forests following fire*. Vegetatio, 87(1), 29-36.
- Munda, G., Nijkamp, P., & Rietveld, P. (1994). *Qualitative multicriteria evaluation for environmental management*. Ecological economics, 10(2), 97-112.
- Muñoz Robles, C. A., Treviño Garza, E. J., Verástegui Chávez, J., Jiménez Pérez, J., & Aguirre Calderón, O. A. (2005). *Desarrollo de un modelo espacial para la evaluación del peligro de incendios forestales en la Sierra Madre Oriental de México*. Investigaciones geográficas, (56), 101-117.
- Pietersen, K. (2006). *Multiple criteria decision analysis (MCDA): A tool to support sustainable management of groundwater resources in South Africa*. In Water SA Vol. 32 No. 2
- Ruiz González, A. D. (2004). *La predicción de la humedad en los restos forestales combustibles: aplicación a masas arboladas en Galicia* (Doctoral dissertation, Montes).
- Rodríguez, Dante (1996). *Incendios Forestales*. Mundi Prensa, UACH. Chapingo, Edo. de Méx. 614 p.
- Rodríguez Trejo, D. A., Rodríguez Aguilar, M., & Fernández Sánchez, F. (2002). *Educación e incendios forestales*. Mundi-Prensa.
- Ross, D. (2005). *Economic theory and cognitive science: Microexplanation*. MIT press.

- Ruiz, L. V., & Blanco, J. L. (2004). *Comportamiento del fuego y evaluación del riesgo por incendios en las áreas forestales de México: un estudio en el Volcán la Malinche*. Incendios forestales en México. Métodos De Evaluación.
- Simon, H. A. (1997). Administrative behavior: A study of decision-making processes in administrative organizations.
- Thaler, R. H. (1986). The psychology and economics conference handbook: Comments on Simon, on Einhorn and Hogarth, and on Tversky and Kahneman. *The Journal of Business*, 59(4), S279-S284.
- Wang, J. J., Jing, Y. Y., Zhang, C. F., & Zhao, J. H. (2009). *Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making*. Renewable and sustainable energy reviews, 13(9), 2263-2278.

2.3 Marco de referencia

Los incendios forestales a nivel mundial son considerados una de las principales causas de la destrucción de la vegetación, constituyendo una amenaza para el manejo sustentable de los recursos naturales y el cuidado del medio ambiente. En ocasiones el fuego tiene como consecuencia, estabilidad dentro de los ecosistemas en los que se presenta, sin embargo, esta estabilidad ha sido crecientemente modificada por la acción humana, a través de la intervención cada vez más agresiva sobre los recursos naturales renovables, alterando este proceso natural, reflejado en importantes cambios en la estructura y composición de especies (Carrillo G., Rodríguez Trejo, Tchikoué, Monterroso Rivas, & Santillan Perez, 2012).

Los incendios forestales han sido objeto de estudio en gran parte del mundo. Su entendimiento es de gran importancia debido a las pérdidas naturales, materiales y humanas que producen (Gómez Pazo & Salas, 2016); paralelamente estos siniestros conforman un proceso vital y esencial para muchos ecosistemas forestales, por ejemplo, en los procesos de sucesión ecológica y mantenimiento de la estabilidad de los ecosistemas, donde el fuego ha estado presente por más de 400 millones de años (Pausas J., 2020); (Scott, A., Bowman, D., Bond, W., & Pyne, 2013); (Pyne S., 2019).

Este papel ecológico también ha sido ampliamente identificado en muchos ecosistemas forestales de México (por ejemplo, (Rodríguez Trejo D. , 1996); (Rodríguez Trejo D. A., 2014); (Jardel Pelaez, Ramírez Villeda, & Castillo, 2007). En la actualidad, a nivel global 75% de los incendios forestales son originados por el ser humano y el cambio climático está exacerbando el comportamiento del fuego. Aunque a nivel mundial se están teniendo menos incendios, estos son de mayor extensión (WWF & BCG, 2020). Se considera que los regímenes de fuego alterados provocan cambios globales que afectan a la biósfera y son la tercera causa en la pérdida y degradación de grandes extensiones de terrenos forestales (Moritz, *et al.*, 2014); (Nieto, I. , Isabel M., & Rey F., 2015).

De acuerdo con las estadísticas registradas por la Comisión Nacional Forestal (2019), México registra aproximadamente 7,500 incendios que afectan 300,000 hectáreas de pastos y arbustos. Sin embargo, el mal manejo del fuego en el sector agrícola, los fuegos ocasionados para el cambio de uso de suelo para la ganadería o la urbanización, aunado a las condiciones climáticas extremas de aumento de la temperatura y sequías “efectos del cambio climático”, además de la acumulación de combustibles, han contribuido a la severidad de las temporadas de incendios forestales, tal es el caso de los grandes incendios ocurridos en las temporadas de 1998, 2011 y 2017 (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2019).

Dada la importancia e interés de la dinámica de estos siniestros, específicamente para México, el Programa Nacional de Incendios Forestales hasta 2012, se enfocó en la supresión total de incendios forestales; sin embargo, los programas eran débiles y existía poca coordinación institucional. En 2013, el país reconoció que la supresión total de los incendios forestales no era suficiente y se propuso modernizar el programa nacional de incendios forestales en un contexto de cambio climático. A diferencia de países como Estados Unidos, Canadá, Australia o Brasil, que cuentan con sus sistemas nacionales de predicción de peligro que obedecen a sus necesidades específicas de incendios, en México no existía ningún sistema propio que elaborara mapas del riesgo de ocurrencia y peligro de incendio en tiempo real, limitando la toma de decisiones de manejo del fuego en el país.

De esta manera en 2014, el Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales para México, fue desarrollado en el proyecto CONACYT-CONAFOR 2014- 2-252620, este sistema funge como una herramienta de apoyo para la toma de decisiones para la prevención y el combate de incendios. Aunque aún no se encuentra terminado, se ha estado desarrollado para los tipos de vegetación de México, a su vez se encuentra calibrado con los históricos de incendios y puntos de calor del país, considerando los patrones específicos de quemados en cada región de la república, así mismo, toma en consideración el factor humano como variable de ocurrencia (Vega Nieva *et al.*, 2018).

En México, los estudios sobre los efectos del fuego son relativamente recientes (Mckenzie, 2004); (Villers & Blanco, 2004), surgen a partir de los cambios que causan sobre los ecosistemas naturales; sus consecuencias destructoras sobre los ecosistemas afectados promueven la necesidad de generar programas y medidas para protegerlos (Mckenzie, 2004). Los estudios sobre ocurrencia de incendios forestales abarcan muy diversos enfoques, entre los que destacan: 1) Generación de índices de peligrosidad mediante el uso de percepción remota (Muñoz Robles, Treviño Garza, Verástegui Chávez, Jiménez Pérez, & Aguirre Calderón, 2005); (Carrillo G., Rodríguez Trejo, Tchikoué, Monterroso Rivas, & Santillan Perez, 2012); 2) Patrones de distribución espacial y temporal (Ávila Flores, y otros, 2010); (Pompa García & Hernández González, 2012); (Pérez Verdín, Márquez Linares, & Cortés O., 2013); (Díaz Hormazábal & González, 2016); 3) Modelos de probabilidad mediante el uso de regresión logística (Cruz Espíndola, Rodríguez Trejo, Villanueva Morales, & Santillán Pérez, 2017); 4) Determinación de puntos de calor para el monitoreo de incendios forestales (Pompa García & Hernández González, 2012); (Muñoz Robles & Santana Arias, 2018) y 5) Análisis multicriterio en sistemas de información geográfica (Renteria Anima, 2004) y (Muñoz Robles C. A., Treviño Garza, Verástegui Chávez, Jiménez Pérez, & Aguirre Calderón, 2005).

Las razones por las que se han desarrollado los estudios citados, es por la necesidad de predecir los incendios forestales para mejorar el combate y la prevención, reduciendo los daños y aumentando la eficiencia del uso de recursos humanos, materiales y financieros en el manejo del fuego. Sin embargo, analizar la vulnerabilidad de un ecosistema forestal al fuego es de suma importancia; en este contexto, la vulnerabilidad a incendios forestales es la susceptibilidad o predisposición intrínseca de algún ecosistema a ser afectado seriamente por fuego, aunado al factor interno de riesgo, dado que esta situación depende principalmente de la actividad humana (Hardy, 2005).

La principal meta de la evaluación de la vulnerabilidad es plantear recomendaciones sobre determinadas acciones para reducir la susceptibilidad que tienen los ecosistemas a ser alterados por agentes exógenos, mediante la evaluación de las

características físico-geográficas y antrópicas que presentan, considerándose indispensables cuando se piensa realizar acciones preventivas contra los incendios.

El riesgo a incendios forestales, se refiere a la probabilidad de ignición (natural o antrópica) y la propagación del fuego, determinada principalmente por las condiciones del estado del tiempo. El peligro por su parte, es el potencial comportamiento del fuego y la severidad de sus efectos sobre los ecosistemas, así como la resistencia de los incendios a los esfuerzos de combate o supresión; el peligro está determinado por la distribución horizontal y vertical de los combustibles, la inflamabilidad, compactación y tamaño del material que puede encenderse y mantener la propagación del fuego (Hardy, 2005). La amenaza se encuentra dada por acciones derivadas de la interacción de la actividad humana y la naturaleza, que son provocadas por el abuso y el descuido del hombre en su relación con el medio ambiente, por ejemplo, no practicar silvicultura preventiva (Castañeda Rojas & Endara Agramont, 2013).

La evaluación del riesgo es una parte crítica de la prevención de incendios forestales ya que los recursos de planificación previos al evento requieren de herramientas objetivas para controlar cuándo y dónde es más probable que ocurra un incendio o cuándo y dónde tendrá más efectos negativos. De esta manera, la evaluación de la vulnerabilidad ante incendios forestales debe considerar el daño causado por el fuego como una parte crítica de la evaluación del riesgo (Chuvieco, Martínez, Román, Hantson, & Pettinari, 2014).

La predicción de la ocurrencia de incendios ha sido una meta importante de investigación en los últimos años, como resultado se han derivado varios métodos de predicción de su ocurrencia cuyo propósito final es la definición de índices de riesgo o peligro de incendio. Estos métodos usan variables meteorológicas como velocidad del viento, precipitación, temperatura, humedad o combinaciones de éstas, mezcladas con modelos de disponibilidad de combustibles (composición y nivel de humedad) y ocasionalmente algunas variables de comportamiento histórico para estimar la ocurrencia de un evento.

Las evaluaciones del desempeño de estos índices muestran por un lado sus deficiencias cuando se tratan de adaptar a condiciones meteorológicas diferentes y por otro lado la necesidad de integrar variables socioeconómicas e institucionales en su diseño, variables sumamente importantes en la determinación del peligro de incendios (Viegas, Sol, Bovio , Nosenzo , & Ferreira, 1994); (Andrews P. , Loftsgaarden D. , & Bradshaw L., 2003).

Existe una amplia diversidad de índices de riesgo o peligro de incendio, los cuales en muchas ocasiones no son incluso comparables y frecuentemente consideran conceptos variados y confusos. Tal variación pone de manifiesto la variedad de objetivos que influyen en el diseño de los distintos índices existentes. Las aplicaciones reportadas son muchas y variadas (Blanchi, Jappiot, & Alexandrian, 2002) tan solo estimaron 50 diferentes aplicaciones a nivel mundial sin contar la integración de estas herramientas a sistemas expertos o sistemas de apoyo a la toma de decisiones (Bonazountas, Kallidromitou, Kassomenos, & Passas, 2005) usados por operadores. En años recientes estos índices se han modificado para emplear imágenes de satélite y ofrecer estimaciones en tiempo real creando lo que se conoce como “Índices de potencial de incendio” (Burgan, Klaver, & Klaver, 1998).

Los índices de riesgo se pueden clasificar de varias formas; sin duda la más simple se basa en el tipo de información usada y la clase de predicción que realiza. Esta clasificación considera dos tipos; los índices de corto plazo y largo plazo. Los primeros hacen estimaciones diarias del riesgo de incendios para propósitos tácticos y operativos, mientras que los segundos evalúan riesgos a varias escalas para fines estratégicos. Los índices de peligro de incendio de largo plazo son indicadores de condiciones estables que favorecen la ocurrencia de un incendio. En la práctica este tipo de índices se usa para determinar áreas con alto riesgo de incendio causado por las condiciones intrínsecas de la zona. Regularmente este tipo de índices se usan para determinar áreas donde se debería reforzar la prevención y combate de incendios por medio de inversión en infraestructura o prioridad en la asignación de presupuesto para prevención (Villers & Blanco, 2004).

Existen varias estrategias para generar este tipo de índices. Un primer enfoque consiste en seleccionar variables relacionadas con la ocurrencia de incendios a través de la revisión de datos históricos, ocasionalmente integrando información espacial con la ayuda de un Sistema de Información Geográfica o SIG (Chuvieco y Congalton, 1989); (Jain, Ravan, Singh, Das, & Roy, 1996). Para integrar estas variables usualmente se recurre a la opinión de expertos, mismos a los que se les pide clasificar estas variables en grupos y asignar a cada variable un peso de acuerdo a su potencial contribución al riesgo de incendio del área estudiada. Esta metodología frecuentemente se acompaña con técnicas de decisión multicriterio (Alcázar, García, Grauet, Pemán, & Fernández, 1998) para tratar de remover parte de la subjetividad en la selección e integración de variables.

Una segunda estrategia para el cálculo de índices de largo plazo involucra el uso de métodos estadísticos y de programación matemática que van desde regresión múltiple con modelos lineales (Castro & Chuvieco, 1998), modelos probabilísticos (Loftsgaarden, 1992); (García , Woodard, Titus, Adamowicz, & Lee, 1995) hasta redes neuronales (García , Woodard, Titus, Adamowicz, & Lee, 1995); (Chuvieco, Salas, Carvacho, & Rodriguez Silva , 1999). Ocasionalmente esta estrategia se acompaña de información socioeconómica, fundamentalmente de mecanismos de toma de decisiones para producir índices útiles en el manejo de incendios locales (Tàbara, Saurí , & Cerdan, 2003).

La ocurrencia de incendios forestales está estrechamente ligada a un gran número de factores; por lo que dicha información con estructura multicriterio ha sido usada en distintos análisis. Sin embargo, éstos no han incluido las metodologías que utilizan relaciones de superación (outranking), como PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enriched Evaluation) (Vincke & Brans, 1985), la cual aprovecha toda la información realizando comparaciones pareadas de todas las alternativas, en todos los criterios (factores o variables). Este método ha sido ampliamente utilizado en la toma de decisiones relacionadas con la selección de alternativas (Vetschera & De Almeida, 2012). De igual manera, en la priorización de conjuntos de opciones (Veza *et al.* 2015), en finanzas (Albadvi, Keramati, &

Razmi, 2007); recursos naturales (Kangas, Kangas, & Pykäläinen, 2001), entre otros más.

2.4 Literatura citada

- Albadvi, A., Keramati, A., & Razmi, J. (2007). *Assessing the impact of information technology on firm performance considering the role of intervening variables: organizational infrastructures and business processes reengineering*. International Journal of Production Research, 45(12), 2697-2734.
- Alcázar, J., Garcia, C. V., Grauet, M., Pemán, J., & Fernández, A. (1998, November). *Human risk and fire danger estimation through multicriteria evaluation methods for forest fire prevention in Barcelona, Spain*. In Proceedings of the 3rd international conference on forest fire research and 14th conference on fire and forest meteorology, Luso (pp. 16-20).
- Andrews, P. L., Loftsgaarden, D. O., & Bradshaw, L. S. (2003). *Evaluation of fire danger rating indexes using logistic regression and percentile analysis*. International Journal of Wildland Fire, 12(2), 213-226
- Ávila Flores, D., Pompa-García, M., Antonio-Nemiga, X., Rodríguez-Trejo, D. A., Vargas-Pérez, E., & Santillán - Pérez, J. (2010). *Driving factors for forest fire occurrence in Durango State of Mexico: A geospatial perspective*. Chinese Geographical Science, 20(6), 491-497.
- Blanchi, R., Jappiot, M., & Alexandrian, D. (2002, November). *Forest fire risk assessment and cartography. A methodological approach*. In Proceedings of the IV International Conference on Forest Fire Research. Luso, Portugal.
- Bonazountas, M., Kallidromitou, D., Kassomenos, P. A., & Passas, N. (2005). *Forest fire risk analysis*. Human and Ecological Risk Assessment, 11(3), 617-626.
- Burgan, R. E., Klaver, R. W., & Klaver, J. M. (1998). *Fuel models and fire potential from satellite and surface observations*. International journal of wildland fire, 8(3), 159-170.

- Carrillo, G. R., Rodríguez, D., Tchikoué, H., Monterroso, A., & Santillan, J. (2012). *Análisis espacial de peligro de incendios forestales en Puebla, México*. Interciencia, 37(9), 678-683.
- Castañeda Rojas, M. F., Endara Agramont, A. R., & Castañeda Rojas, M. F. (2013). *Evaluación de zonas vulnerables a incendios forestales en bosques de alta montaña del Estado de México* (Master's thesis, Universidad Autónoma del Estado de México).
- Castro, R., & Chuvieco, E. (1998). *Modeling forest fire danger from geographic information systems*. Geocarto International, 13(1), 15-23.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2019). Incendios forestales: Serie histórica de datos. Recuperado de: <https://datos.gob.mx/busca/organization/conafor> (ultima consulta: 09 de noviembre 2020)
- Cruz Espíndola, M. Á., Rodríguez Trejo, D. A., Villanueva Morales, A., & Santillán Pérez, J. (2017). *Factores sociales de uso del suelo y vegetación asociados a los incendios forestales en Hidalgo*. Revista mexicana de ciencias forestales, 8(41), 139-163.
- Chuvieco, E., & Congalton, R. G. (1989). *Application of remote sensing and geographic information systems to forest fire hazard mapping*. Remote sensing of Environment, 29(2), 147-159.
- Chuvieco, E., Salas, F. J., Carvacho, L., & Rodríguez-Silva, F. (1999). *Integrated fire risk mapping*. In 'Remote Sensing of Large Wildfires'. (Ed. E Chuvieco) pp. 61–100.
- Chuvieco, E., Martínez, S., Román, M. V., Hantson, S., & Pettinari, M. L. (2014). *Integration of ecological and socio-economic factors to assess global vulnerability to wildfire*. Global Ecology and Biogeography, 23(2), 245-258.

- Díaz Hormazábal, I., & González, M. E. (2016). Análisis espacio-temporal de incendios forestales en la región del Maule, Chile. *Bosque (Valdivia)*, 37(1), 147-158.
- Flores Garnica JG, Rodríguez-Trejo DA, Estrada-Murrieta O, Sánchez-Zárraga F (coords). Incendios forestales. CONAFOR-Mundi Prensa. México, DF, 215-242.
- García, C. V., Woodard, P. M., Titus, S. J., Adamowicz, W. L., & Lee, B. S. (1995). *A logit model for predicting the daily occurrence of human caused forest-fires*. *International Journal of Wildland Fire*, 5(2), 101-111.
- Gómez Pazo, A., & Salas, J. *Modelado del peligro de ignición de incendios forestales en Galicia (España)*.
- Hardy, C. C. (2005). *Wildland fire hazard and risk: problems, definitions, and context*. *Forest ecology and management*, 211(1-2), 73-82.
- Kangas, A., Kangas, J., & Pykäläinen, J. (2001). *Outranking methods as tools in strategic natural resources planning*.
- Jain, A., Ravan, S. A., Singh, R. K., Das, K. K., & Roy, P. S. (1996). *Forest fire risk modelling using remote sensing and geographic information system*. *Current Science*, 928-933.
- Jardel Pelaez, E., Ramírez Villeda, R., Castillo Navarro, F., García Ruvalcaba, S., Balcázar, O. E., Chacón Mathieu, J. C., & Morfín Ríos, J. (2007). *Manejo del fuego y restauración de bosques en la reserva de la biosfera Sierra de Manantlán, México* in Flores Garnica JG, Rodríguez Trejo DA, Estrada Murrieta O, Sánchez Zárraga F (coords). Incendios forestales. CONAFOR-Mundi Prensa. México, DF, 215-242.
- Loftsgaarden, D. O. (1992). *Constructing and testing logistic regression models for binary data: applications to the National Fire Danger Rating System* (Vol. 286). US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station.

- Mckenzie, D. (2004). *La historia del fuego y su relación. Incendios forestales en México: métodos de evaluación*, 13.
- Nieto, I. G., Isabel, M. P. M., & Rey, F. J. S. (2015). *Análisis del régimen de incendios forestales y su relación con los cambios de uso del suelo en la Comunidad Autónoma de Madrid (1989-2010)*. *Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (16), 12.
- Moritz, M. A., Batllori, E., Bradstock, R. A., Gill, A. M., Handmer, J., Hessburg, P. F., ... & Syphard, A. D. (2014). *Learning to coexist with wildfire. Nature*, 515(7525), 58-66. Oliver, C. D., & Larson, B. C. (1996). *Forest Stand Dynamics* (update edition). New York: John Wiley.
- Muñoz Robles, C. A., Treviño Garza, E. J., Verástegui Chávez, J., Jiménez Pérez, J., & Aguirre Calderón, O. A. (2005). *Desarrollo de un modelo espacial para la evaluación del peligro de incendios forestales en la Sierra Madre Oriental de México*. *Investigaciones geográficas*, (56), 101-117.
- Muñoz Robles, C., & Santana Arias, R. (2018). *Puntos de calor en la Sierra Madre Oriental de San Luis Potosí: patrones espaciales y factores asociados*. *Madera y bosques*, 24(1).
- Pausas, J. G. (2020). *Incendios forestales*. Los libros de la catarata.
- Pyne, S. J. (2019). *Fire: a brief history*. University of Washington Press.
- Rodríguez, Dante (1996). *Incendios Forestales*. Mundi Prensa, UACH. Chapingo, Edo. de Méx. 614 p.
- Rodríguez, Dante (2014). *Incendios de Vegetación. Su Ecología, Manejo e Historia*. Vol. 1. Ed. C.P., UACH, Semarnat, Conafor, Conanp. México. 889 p.
- Pérez Verdín, G., Márquez Linares, M. A., Cortés Ortiz, A., & Salmerón Macías, M. (2013). *Análisis espacio-temporal de la ocurrencia de incendios forestales en Durango, México*. *Madera y bosques*, 19(2), 37-58.

- Pompa García, M., & Hernández González, P. (2012). *Determinación de la tendencia espacial de los puntos de calor como estrategia para monitorear los incendios forestales en Durango, México*. Bosque (Valdivia), 33(1), 63-68.
- Rentería Anima, J. B. (2004). *Desarrollo de modelos para el control de combustibles en el manejo de ecosistemas forestales en Durango, México* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- Scott, A. C., Bowman, D. M., Bond, W. J., Pyne, S. J., & Alexander, M. E. (2013). *Fire on earth: an introduction*. John Wiley & Sons.
- Tàbara, D., SAURÍ, D., & Cerdan, R. (2003). *Forest fire risk management and public participation in changing socioenvironmental conditions: a case study in a Mediterranean region*. Risk Analysis: AN INTERNATIONAL JOURNAL, 23(2), 249-260.
- Vega Nieva, D. J., Nava Miranda, M. G., Calleros Flores, E., López Serrano, P. M., Briseño Reyes, J., Medina, F. F. & Jiménez, E. (2019). *Desarrollo de un Sistema Nacional de Peligro de Incendios Forestales Para México*. Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-261, (Español). Albany, CA: Departamento de Agricultura de los EE. UU., Servicio Forestal, Estación de Investigación del Pacífico Suroeste: 42-52., 261, 42-52.
- Vetschera, R., & De Almeida, A. T. (2012). *A PROMETHEE-based approach to portfolio selection problems*. Computers & Operations Research, 39(5), 1010-1020.
- Veza, I., Celar, S., & Peronja, I. (2015). *Competences-based comparison and ranking of industrial enterprises using PROMETHEE method*. Procedia Engineering, 100, 445-449.
- Viegas, D., Sol, B., Bovio, G., Nosenzo, A., & Ferreira, A. (1994). *Comparative study of various methods of fire danger evaluation in southern Europe*. In 2nd International Conference on Forest Fire Research (Vol. 1, pp. 1-10). Viegas.

- Vincke, J. P., & Brans, P. (1985). *A preference ranking organization method. The PROMETHEE method for MCDM*. Management Science, 31(6), 647-656.
- Villers, L., & Blanco, J. (2004). *Incendios forestales en México: métodos de evaluación*. Universidad Nacional Autónoma de México–Centro de Ciencias de la Atmósfera. México, DF, México.
- WWF (World Wildlife Foundation), and BCG (Boston Consulting Group) (2020). *Fires, forests and the future: A crisis raging out of control?* WWF, BCG. Switzerland. 20 p.

CAPITULO 3. SUSCEPTIBILIDAD AL FUEGO EN EL CAMPO FORESTAL EXPERIMENTAL LAS CRUCES, TEXCOCO, MÉXICO: UNA PRIORIZACIÓN BASADA EN EL ENFOQUE MULTICRITERIO

Susceptibility to fire in the Experimental Forest Field of Las Cruces, Texcoco, Mexico: a prioritization based on the multi-criteria approach

3.1 RESUMEN

Los incendios forestales son fenómenos de gran relevancia debido a los efectos negativos que estos producen al ambiente, pese a eso, estos siniestros forman parte del balance ecológico de varios ecosistemas. La ocurrencia de incendios está relacionada con un gran número de variables. Los estudios sobre la ocurrencia de incendios abarcan diversos enfoques, sin embargo, al momento no se ha aplicado la metodología utilizada para este estudio y que involucre todas estas variables. Esta investigación se realizó con el objetivo de priorizar un conjunto de 30 sitios forestales con base en su susceptibilidad a incendios en el Campo Forestal Experimental las Cruces, Texcoco, México. Se utilizó el método PROMETHEE II, tomando en cuenta el conjunto de variables de mayor importancia en la incidencia de incendios forestales. Se requirió información levantada en campo, bases de datos, cartográfica y entrevistas a expertos en tema de incendios. Se determinaron los tipos de vegetación predominante mediante SIG; asimismo se calcularon las cargas de combustible forestal disponibles. Finalmente, se identificaron en un mapa los cinco sitios que resultaron más susceptible a los incendios.

Palabras clave:

Incendios, combustible, toma de decisiones multicriterio, priorización, vulnerabilidad

3.2 ABSTRACT

Forest fires are phenomena of great relevance due to the adverse effects on the environment; however, these events are part of various ecosystems' ecological balance. The occurrence of fires is related to many variables. Studies on fires cover

multiple approaches; however, the methodology here utilized and involving all these variables has not been applied. This research was carried out to prioritize a set of 30 forest sites based on their susceptibility to fires in the Las Cruces Experimental Forest Field, Texcoco, Mexico. The PROMETHEE II method was used, considering the set of variables of most significant importance in the incidence of forest fires. Information collected in the field, databases, cartography, and interviews with experts on fire issues were required. The predominant vegetation types were determined by GIS; the available forest fuel loads were also calculated. Finally, the five sites that were most susceptible to fires were identified on a map.

Keywords:

Fire, fuel, multi-criteria decision making, prioritization, vulnerability

3.3 INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales han sido objeto de estudio en gran parte del mundo. Su entendimiento es de gran importancia debido a las pérdidas naturales, materiales y humanas que producen (Gómez y Salas, 2017); paralelamente estos siniestros conforman un proceso vital y esencial para muchos ecosistemas forestales, por ejemplo, en los procesos de sucesión ecológica y mantenimiento de la estabilidad de los ecosistemas, donde el fuego ha estado presente por más de 400 millones de años (Pausas, 2019; Scott *et al.*, 2014; Pyne, 2019). Este papel ecológico también ha sido ampliamente identificado en muchos ecosistemas forestales de México (por ejemplo, Rodríguez, 1996, 2014; Jardel *et al.*, 2006). En la actualidad, a nivel global 75% de los incendios forestales son originados por el ser humano y el cambio climático está exacerbando el comportamiento del fuego. Aunque a nivel mundial se están teniendo menos incendios, estos son de mayor extensión (WWF and BCG, 2020). Se considera que los regímenes de fuego alterados provocan cambios globales que afectan a la biósfera y son la tercera causa en la pérdida y degradación de grandes extensiones de terrenos forestales (Moritz *et al.*, 2014; Gómez *et al.*, 2015).

De acuerdo con las estadísticas registradas por la Comisión Nacional Forestal (2019), México registra aproximadamente 7,500 incendios que afectan 300,000 hectáreas de pastos y arbustos. Sin embargo, el mal manejo del fuego en el sector agrícola, los fuegos ocasionados para el cambio de uso de suelo para la ganadería o la urbanización, aunado a las condiciones climáticas extremas de aumento de la temperatura y sequías “efectos del cambio climático”, además de la acumulación de combustibles, han contribuido a la severidad de las temporadas de incendios forestales, tal es el caso de los grandes incendios ocurridos en las temporadas de 1998, 2011 y 2017 (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2019).

La susceptibilidad a incendios forestales se entiende como una condición que aumenta la probabilidad de un ecosistema a ser afectado por fuego (Hardy, 2005). Está relacionada con la noción de riesgo; es decir, la probabilidad de ignición (natural o antrópica) y la propagación del fuego, la cual está determinada principalmente por las condiciones climatológicas. Sin embargo, los incendios forestales son multicausales, es decir, dependen de un gran número de variables, las cuales no pueden ser controladas, no obstante, la susceptibilidad a incendios forestales es un tema clave para la determinación de áreas vulnerables.

En México, los estudios sobre ocurrencia de incendios forestales abarcan muy diversos enfoques, entre los que destacan: 1) Generación de índices de peligrosidad mediante el uso de percepción remota (Muñoz, 2005; Carrillo *et al.* 2012); 2) Patrones de distribución espacial y temporal (Ávila, 2010; Pompa, 2012; Pérez, 2013; Díaz, 2016); 3) Modelos de probabilidad mediante el uso de regresión logística (Cruz, 2017); 4) Determinación de puntos de calor para el monitoreo de incendios forestales (Pompa y Hernández, 2012; Muñoz, 2018) y 5) Análisis multicriterio en sistemas de información geográfica (Rentería, 2004; Muñoz *et al.*, 2005).

Dada la importancia e interés de la dinámica de estos siniestros, específicamente para México, en 2014 fue desarrollado el Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales. Este sistema funge como herramienta de apoyo a la toma de decisiones para la prevención y el combate de incendios. Este sistema permite evaluar en tiempo real las condiciones de sequedad de combustible y el peligro de

fuego asociado, dado que se encuentra integrado por un conjunto de variables meteorológicas en tiempo real, tipos de vegetación, así mismo se encuentra calibrado con los históricos de incendios y puntos de calor del país, considerando los patrones específicos de quemados en cada región de la república, incluyendo el papel del factor humano, como carreteras, poblados y el calendario agrícola en la temporalidad de ocurrencia de incendios para cada región de México (Vega *et al.*, 2019).

La ocurrencia de incendios forestales está estrechamente ligada a un gran número de factores. Dicha información con estructura multicriterio ha sido usada en distintos análisis. Sin embargo, éstos no han incluido las metodologías que utilizan relaciones de superación (outranking), como PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enriched Evaluation) (Brans y Vincke, 1985), la cual aprovecha toda la información realizando comparaciones pareadas de todas las alternativas, en todos los criterios (factores o variables). Este método ha sido ampliamente utilizado en la toma de decisiones relacionadas con la selección de alternativas (Vetschera y Almeida, 2012; Fadlina *et al.* 2017). De igual manera, en la priorización de conjuntos de opciones (Veza *et al.* 2015), en finanzas (Albadvi *et al.* 2014) y recursos naturales (Kangas *et al.* 2001), y otros más.

Por lo anterior, el objetivo de la presente investigación consistió en priorizar un conjunto de sitios forestales con base en su susceptibilidad a los incendios en el Campo Forestal Experimental las Cruces, mediante el método PROMETHEE II, con la finalidad de identificar los sitios de mayor susceptibilidad en un mapa y tomarlos en cuenta para el manejo del fuego en el área.

3.4 MÉTODO

3.4.1 Área de estudio

El Campo Forestal Experimental las Cruces (CFEC) se encuentra ubicado en la región oriente del Estado de México y centro sur del municipio de Texcoco. Geográficamente se ubica 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 entre 2480 y 2640 msnm (Villegas y Macedo, 2015). Cuenta con una superficie total de 325.75 ha, de las cuales 66 ha corresponden a superficie de conservación y 259 ha corresponden a restauración ecológica (Figura 4).

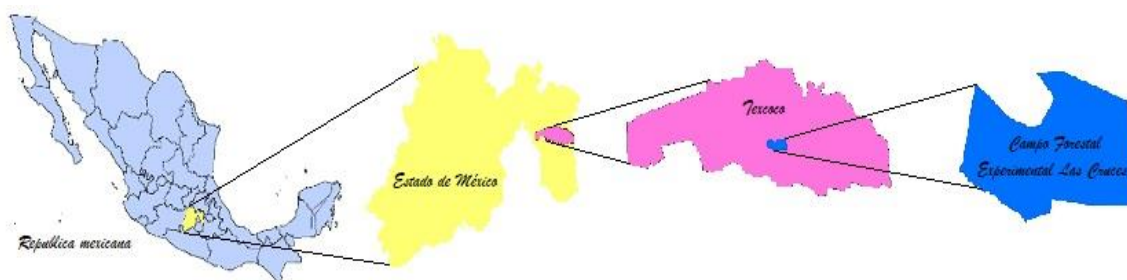


Figura 4. Ubicación del Campo Forestal Experimental las Cruces, Texcoco, México.

3.4.2 Identificación de variables de ocurrencia

Como primera etapa se identificaron las variables asociadas a la ocurrencia de incendios en el Campo Forestal Experimental las Cruces, éstas se determinaron a partir de revisión bibliográfica, se tomaron como base los trabajos realizados por Rodríguez *et al.*, 2008 y Carrillo *et al.*, 2012. Así mismo se efectuaron dos recorridos de campo (agosto 2019 y enero 2020) con la finalidad de identificar puntualmente las variables antrópicas que afectan el área. Adicionalmente se realizaron seis entrevistas, de las cuales, dos fueron a profesores investigadores expertos en el tema de incendios forestales, tres a profesores investigadores de la Universidad Autónoma Chapingo y una entrevista al ingeniero responsable operativo de la estación forestal experimental las cruces.

Tomando en consideración que el área tiene como principal objetivo la investigación, con apoyo de expertos en el tema de incendios forestales, se realizó un filtro de las variables identificadas previamente mediante revisión bibliográfica. Tales variables se clasificaron en cuatro categorías: climatológicas, topográficas, susceptibilidad de la vegetación a incendios y antrópicas (Cuadro 1).

Cuadro 1. Variables que potencialmente asociadas con la ocurrencia de incendios forestales

Climatológicas	Topográficas	Susceptibilidad de la vegetación a incendios	Antrópicos
Temperatura máxima (°C)	Altitud	Tipo de cobertura vegetal predominante	Vías de acceso primarias y secundarias
Temperatura mínima (°C)	Exposición	Forma de vida dominante	Apoyos gubernamentales
Temperatura media (°C)	Pendiente	Tipo de combustible predominante	Ecoturismo
Velocidad del viento máxima (km/hr)	Posición topográfica	Carga de combustible total	Quema agrícola
Velocidad del viento mínima (km/hr)	Forma del terreno	Duración de combustible predominante	Pastoreo
Velocidad del viento media (km/hr)	Tipo de suelo	Afectación por incendio forestal	Proximidad a poblaciones
Humedad relativa promedio (%)		Número de incendios forestales (no.)	Fumadores
Humedad relativa máxima (%)		Prácticas de prevención de incendios	Quema de basura
Humedad relativa mínima (%)			Vandalismo/ Intencionados
Precipitación acumulada mensual promedio (mm)			Negligencia
Precipitación acumulada mensual máxima (mm)			
Precipitación acumulada mensual mínima (mm)			
Precipitación acumulada total en el periodo (mm)			
Radiación solar			
Periodos de sequia			

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3 Conformación de la base de datos

Una vez que se determinaron las variables de ocurrencia, se generó una base de datos para lo cual se dispuso de los reportes de incendios forestales de la Comisión Nacional Forestal y de los registros elaborados por Protectora de Bosques (PROBOSQUE) en el periodo de 2008-2018, cabe mencionar que esta información se utilizó para indicar la localización exacta, fecha, tipo de vegetación afectado, tipo de incendio, así como la superficie de los incendios ocurridos en este periodo.

Para la obtención de datos meteorológicos se utilizó el paquete ERIC III ©; se identificaron las estaciones climatológicas próximas al área de estudio, se extrajo la información proporcionada de datos de temperatura y precipitación, dado que algunos registros se encontraron vacíos, se recurrió a la base de datos del sistema CLICOM de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2020) con la finalidad de complementar dicha base de datos.

Con el propósito de obtener las variables topográficas, se utilizó el programa ArcGIS 10.4.1 © para la generación de un modelo digital de elevación con una resolución espacial de 15 m a partir de curvas de nivel, obteniendo así datos de pendiente y exposición. Para el caso de los datos correspondiente a tipo de suelo, fisiografía y posición topográfica se utilizó la información referida en las cartas de edafología y fisiografía de INEGI escala 1:50 000.

3.4.4 Determinación de los tipos de vegetación predominantes

Para la identificación de los tipos de vegetación predominantes en el área de estudio, se utilizó la técnica del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada y el algoritmo de máxima verosimilitud. Para lo cual se requirió de imágenes satelitales (Sentinel 2a con fecha 02-03-2020), las cuales fueron cargadas en el programa Sen2Cor para llevar a cabo la corrección atmosférica necesaria para

posteriormente ser procesadas en el programa ArcGIS 10.4.1© mediante la herramienta Image Analysis con la cual de manera automática se efectuó la clasificación supervisada de la cobertura vegetal.

Para el cálculo del índice de vegetación se utilizó la siguiente expresión (ESA, 2018):

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R}$$

Donde:

- NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
- ρ_{NIR} : Banda de Infrarrojo cercano
- ρ_R : Banda del Rojo

Con el propósito de verificar la clasificación supervisada se realizaron recorridos de campo identificando cada una de las unidades vegetales y su dominancia de especies.

3.4.5 Selección de sitios de muestreo

Se llevo a cabo un muestreo estratificado (Schreuder *et al.*, 2006), donde los estratos corresponden a los criterios de: a) Tipo de cobertura vegetal predominante, b) área con registro (reportes emitidos por CONAFOR y/o PROBOSQUE) o evidencia de incendio forestal (huellas de quemado en los troncos, restos de vegetación incendiada, etc.) durante el periodo 2008-2018 y c) área no incendiada durante el periodo 2008- 2018.

De esta manera se seleccionaron 15 sitios para áreas con registro o evidencia de incendio forestal y 15 sitios para área no incendiada; a su vez estos sitios se dividieron en los 5 tipos de cobertura vegetal predominante determinados.

3.4.6 Recolección de datos

La recolección de datos para la cuantificación de combustible forestal se realizó durante los meses de marzo y abril, esto con la finalidad de obtener información referente a la temporada con mayor incidencia de incendios forestales.

Para la estimación de cargas combustibles forestales se siguió la metodología del Sistema para el cálculo de combustibles forestales desarrollada por INIFAP, la cual utiliza como información de entrada, datos de levantamientos de campo mediante la técnica de intersecciones planares descrita por Brown *et al.* (1982).

Se requirió de los siguientes materiales: brújula, GPS, cuadro para campo con formatos, lápiz, regla, cinta métrica de 50 m de longitud, flexómetro, cuerdas de 15 m (marcadas a 3.5 y 7 m), estacas, tubos de CPVC de 30 cm de longitud, bolsas de estraza, calibrador de combustibles forestales, marcador permanente, cámara fotográfica.

La estrategia de muestreo que se utilizó para la recolección de datos fue el diseño de un conglomerado de muestreo de combustibles forestales. A partir del centro del conglomerado se ubican tres sitios de muestreo, a una distancia de 8.9 m y en ángulos de azimut 0° , 120° y 240° .

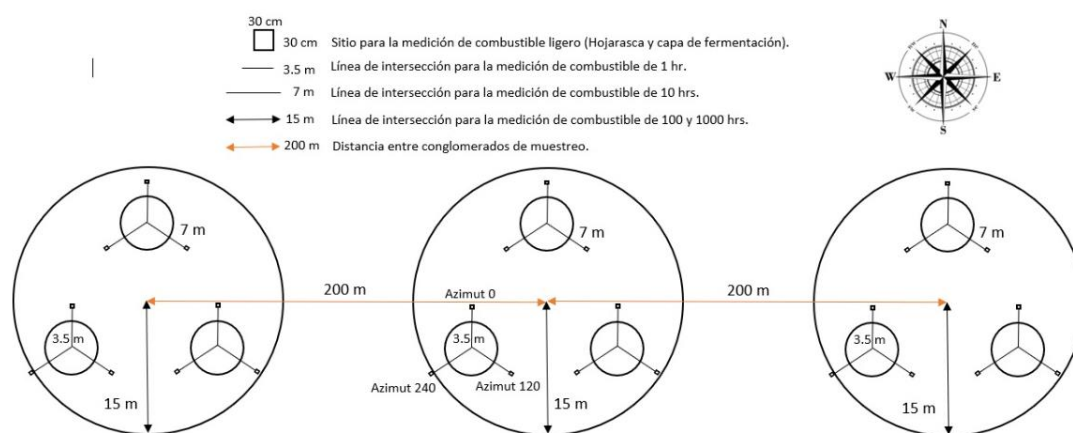


Figura 5. Diseño de muestreo de los conglomerados para la evaluación de combustibles forestales (Fuente: Elaboración propia)

Posteriormente localizado el punto central del conglomerado se conformaron tres transectos con las siguientes características (Figura 5):

- Tres líneas de intersecciones planares, en las cuales se midió el combustible grueso o material leñoso caído, la línea se marcó con cuerdas de 15 m de longitud orientadas a 0°, 120° y 240° de azimut. Los combustibles de 1 h de tiempo de retardo se midieron a una distancia de 0 a 3.5 m, los combustibles de 10 h de 0 a 7 m y para los combustibles de 100 y 1000 h de 0 a 15 m sobre la línea de muestreo.
- Un círculo de 3.5 m. de radio para medición de combustible vivo, arbustos, hierbas, pastos y regeneración; el círculo se localizó marcando las cuerdas a 3.5m de distancia del centro.

Al final de cada transecto se ubicó un cuadro de muestreo de 30 x 30 cm para la medición de los combustibles finos. En este cuadro se tomaron los datos de profundidad y porcentaje de las diferentes capas presentes (capa de hojarasca, capa de fermentación, cobertura de capa de hierbas, cobertura de capa de pastos). Adicionalmente en bolsas de papel estraza se colectó la hojarasca, hierbas y pastos que se encontraron dentro del cuadro de muestreo, cada muestra fue etiquetada y pesada; luego se colocaron en una estufa de secado (elaboración propia), dichas muestras se pesaron a las 12, 24, 48 y 72 h o hasta alcanzar un peso constante.

3.4.7 Cuantificación de cargas de combustible

Después que se obtuvieron los datos de campo y los datos de peso seco de las muestras colectadas, se procedió a calcular las cargas de combustible por tipo de cobertura vegetal predominante con el Sistema para el Cálculo de Combustibles Forestales (SICCO) (Flores, *et al.*, 2016).

Este sistema se encuentra fundamentado por dos grupos de ecuaciones. El primero de estos se usa para la estimación de cargas de combustibles leñosos de 1, 10 y 100 y 1000 h, los cuales se basan en el conteo de las intersecciones planares. Este grupo de ecuaciones fueron definidas por Brown *et al.* (1982). El segundo grupo se usa para la estimación de las cargas de combustibles de los que se obtuvieron muestras de campo, es decir la hojarasca y material en fermentación.

El sistema SICCO se encuentra desarrollado en el programa Microsoft Excel ©. Este archivo contenedor de las hojas de cálculo se encuentra dividido de tal manera que se almacena información del sistema, secciones de entrada y salida de datos, así como los cálculos necesarios para estimación de combustibles de acuerdo con su clasificación en 1 h, 10 h, 100 h, 1000 h firmes, 1000 h podridos, combustibles finos hojarasca y material de fermentación.

3.4.8 Ponderación de variables

Dado que en el contexto de los incendios forestales es difícil pensar que todas las variables consideradas tengan el mismo peso de importancia, se procedió a determinar dichos pesos. Para ello se utilizó el método subjetivo conocido como “asignación de puntos” (OECD, 2008; Zardari, *et al.*, 2015), el cual, con la participación de 5 expertos, consistió en distribuir 100 puntos entre el conjunto de las variables. El procedimiento se realizó en dos etapas: la primera consistió en distribuir 100 puntos entre las cuatro categorías de variables, y de ese modo determinar el peso de importancia de cada categoría. La segunda etapa consistió en distribuir 100 puntos entre las variables de cada categoría. Finalmente, los resultados fueron normalizados para obtener el peso final de cada variable.

3.4.9 Método PROMETHEE II

PROMETHEE pertenece al grupo de métodos multicriterio que se utilizan para priorizar un conjunto de alternativas evaluadas en distintos criterios, con diferentes pesos de importancia. La versión PROMETHEE I provee un ordenamiento parcial de las alternativas, sin embargo, la versión PROMETHEE II tiene la capacidad de producir un ordenamiento completo de las alternativas (Athawale y Charkroborty, 2010).

Una vez establecida la matriz de decisión (Cuadro 2), el método considera principalmente tres estimaciones: grados de preferencia; flujos unicriterio, y flujos Globales.

Cuadro 2. Matriz de decisión

W	w_1	w_2	$\dots$	w_m
A	f_1	f_2	$\dots$	f_m
a_1	$f_1(a_1)$	$f_2(a_1)$	$\dots$	$f_m(a_1)$
a_2	$f_1(a_2)$	$f_2(a_2)$	$\dots$	$f_m(a_2)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
a_n	$f_1(a_n)$	$f_2(a_n)$	$\dots$	$f_m(a_n)$

Donde:

$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, es el conjunto de alternativas,

$F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$, es el conjunto de criterios,

$f_i(a_j)$ es la evaluación de la alternativa a_j en el criterio f_i (también llamado desempeño de a_j en f_i). Se asume que $f_i(a_j)$ es un valor numérico,

$W = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$, tal que $\sum_1^m w_i = 1$, son los pesos de los criterios.

1. Grados de preferencia. Éstos son denotados por (P_{ij}^k) y se estiman para cada par ordenado (a_i, a_j) en cada criterio f_k , utilizando alguna función de preferencia. (P_{ij}^k) refleja cuán fuerte es preferida a_i con respecto a la a_j , basada únicamente en el criterio f_k . Es un número entre 0 y 1, y es una función de la diferencia en las evaluaciones $f_k(a_i) - f_k(a_j)$. Por otra parte, (P_{ji}^k) refleja el grado de preferencia de a_j con respecto a a_i .

En el proceso de estimar (P_{ij}^k) y (P_{ji}^k) se pueden utilizar distintas funciones de preferencia. Brans y de Smet (2016) sugieren seis funciones entre las cuales se encuentra la función tipo I de criterio usual, la cual se caracteriza por considerar $q = p = 0$. El que el umbral de indiferencia (q) y el umbral de preferencia (p) sean cero, significa que cualquier diferencia positiva entre las alternativas comparadas implica un grado de preferencia igual 1. En cualquier otro caso, el grado de preferencia es cero. Esto es,

$$P_{ij}^k = \begin{cases} 0 & \text{si } f_k(a_i) - f_k(a_j) \leq 0 \\ 1 & \text{si } f_k(a_i) - f_k(a_j) > q \end{cases} \quad (1)$$

2. Flujos unicriterio. Se calculan en tres modalidades para todas las alternativas: el flujo unicriterio positivo (FUP) de a_i expresa el promedio de los grados de preferencia (o nivel de superación) de esta alternativa en el criterio k con respecto al resto; el flujo unicriterio negativo (FUNeg) de a_i expresa el promedio de los grados de preferencia del resto de las alternativas con respecto a ésta. El flujo unicriterio neto (FUN) es la diferencia de ambos flujos unicriterio. Esto es,

$$FUP = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n P_{ij}^k \quad (2)$$

$$FUNeg = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n P_{ji}^k \quad (3)$$

$$FUN = FUP - FUNeg \quad (4)$$

Los flujos globales positivos (Φ^+), negativos (Φ^-) y netos (Φ) se estiman mediante las fórmulas 5, 6 y 7.

$$\Phi^+ = w_1 \left(\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n P_{ij}^1 \right) + w_2 \left(\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n P_{ij}^2 \right) + \dots + w_n \left(\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n P_{ij}^k \right) \quad (5)$$

$$\Phi^- = w_1 \left(\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n P_{ji}^1 \right) + w_2 \left(\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n P_{ji}^2 \right) + \dots + w_n \left(\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n P_{ji}^k \right) \quad (6)$$

$$\Phi = \Phi^+ - \Phi^- \quad (7)$$

Los flujos globales netos son los que determinan la priorización.

3.5 RESULTADOS

El cuadro 3 presenta los desempeños de los sitios en los criterios considerados de mayor influencia en la ocurrencia de incendios forestales en el área de estudio. Los valores que se muestran son el resultado del desarrollo de los distintos métodos descritos en la sección anterior, preparados para ser insumos en la aplicación del método PROMETHEE II.

Enseguida se analizaron los resultados en cada una de las variables (criterios), se eliminaron todas aquellas cuyos valores eran prácticamente los mismos en todos los sitios. Esto fue así porque, de acuerdo con la metodología PROMETHEE, tales cantidades no serían útiles para la definición de las preferencias ni de la superación de los distintos sitios entre sí. Esto explica por qué los criterios considerados se redujeron a 22, distribuidos en las distintas categorías de la siguiente manera: climatológicos: 1; topográficos: 5; susceptibilidad de la vegetación: 6; antrópicos: 10.

Asimismo, se identificaron los criterios cuya expresión de estado no corresponde a variables numéricas. La información de éstos fue convertida a valores numéricos asociados al nivel de susceptibilidad, utilizando escalas apropiadas. Este es el caso de los siguientes criterios, cuya información sobre sus estados, y valores numéricos asignados, fueron:

- Exposición (C3): Norte (5); Noreste (4); Cenital (3); Este (3); Oeste (3).
- Posición topográfica (C5): Ladera alta (5); Ladera media (4); Ladera baja (3); Llanura (2); Valle (1).
- Forma de terreno (C6): Compleja (4); Convexa (3); Ondulada (2); Plana (1).
- Vegetación predominante (C7): Casuarina (5); Cedro (4); Eucalipto (3); Pino (2); Encino (1).
- Forma de vida predominante (C8): Pasto (3); Arbusto (2); Árbol (1).
- Área con/sin incendio (C10): Presencia (1); Ausencia (0).
- Las variables antrópicas (C14-C22): Presencia (1); Ausencia (0).

Por otra parte, los criterios pueden ser de dos tipos: a maximizar y a minimizar. A maximizar son aquellos cuyos valores numéricos, mientras más grandes sean, hacen menos susceptible la ocurrencia de incendios, como los criterios Altitud (C2), Vías de acceso (C13) y Prácticas de prevención de incendios (C22). Por el contrario, a minimizar son los criterios cuyos valores numéricos, mientras sean menores, hacen menos susceptible la ocurrencia de incendios, este es el caso del resto de los criterios.

Cuadro 3. Desempeño de los sitios en cada criterio

Tipo de criterio	Min	Max	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Max	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Max
W	0.2	0.02	0.03	0.03	0.01	0.01	0.02	0.02	0.1	0.01	0.03	0.02	0.1	0.02	0.02	0.02	.01	0.02	0.01	0.05	0.05	0.2
Sitio	Climatológicos		Topográficos				Susceptibilidad de la vegetación a incendios						Antrópicos									
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22
1	30	2537	4	53.1	5	3	1	2	13.63	1	3	2	95.25	1	1	0	0	0	1	1	1	1
2	30	2562	4	46.6	5	3	1	1	15.70	1	3	2	71.43	1	1	0	0	0	1	1	1	1
3	29	2515	4	50.9	6	4	1	3	25.07	1	3	2	128.59	1	1	0	0	0	1	1	1	1
4	29	2618	3	36.3	4	3	1	1	22.11	0	0	0	118.83	0	1	0	0	0	0	0	0	0
5	28	2622	5	46.6	4	3	1	1	29.95	0	0	0	98.03	0	1	0	0	0	0	0	0	0
6	30	2598	4	70	5	3	1	3	17.93	0	0	0	106.08	0	1	0	0	0	0	0	0	0
7	30	2608	3	12.2	3	2	3	1	27.37	1	19	3	69.75	1	0	0	1	0	1	1	1	1
8	28	2621	3	5.2	1	1	3	2	17.39	1	19	3	131.99	1	0	0	1	0	1	1	1	1
9	28	2610	3	5.2	1	1	3	2	20.33	1	19	3	30.05	1	0	0	1	0	1	1	1	1
10	29	2581	3	8.7	3	2	3	2	24.06	0	0	0	140.18	1	0	0	1	0	0	1	1	0
11	29	2595	3	10.5	3	1	3	2	24.11	0	0	0	133.12	1	0	0	1	0	0	1	1	0
12	28	2569	3	3.4	1	2	3	1	21.33	0	0	0	32.79	1	0	0	1	0	0	1	1	0
13	30	2483	3	6.9	4	2	2	1	16.45	1	23	3	50.68	1	0	1	1	1	1	1	1	0
14	28	2479	4	10.5	2	1	2	1	19.66	1	23	3	107.46	1	0	1	1	1	1	1	1	0
15	29	2494	3	5.2	2	1	2	1	16.36	1	23	3	75.71	1	0	1	1	1	1	1	1	1
16	28	2516	3	8.7	4	3	2	3	15.55	0	0	0	73.49	1	0	1	1	1	0	1	1	1
17	30	2502	3	6.9	3	2	2	2	22.42	0	0	0	76.69	1	0	1	1	1	0	1	1	1
18	29	2514	3	5.2	1	1	2	2	19.45	0	0	0	4.95	1	0	1	1	1	0	1	1	1
19	28	2644	3	15.8	3	2	4	1	21.59	1	15	3	41.28	1	0	0	1	0	1	1	1	0
20	28	2628	3	6.9	1	2	4	1	27.30	1	15	3	56.42	1	0	0	1	0	1	1	1	0
21	30	2652	3	5.2	1	1	4	2	16.57	1	15	3	44.42	1	0	0	1	0	1	1	1	0
22	29	2616	1	12.2	5	4	4	1	22.25	0	0	0	28.32	1	0	0	1	0	0	1	1	0

23	28	2598	1	15.8	4	3	4	1	17.25	0	0	0	74.71	1	0	0	1	0	0	1	1	0
24	30	2633	1	12.2	3	3	4	1	24.43	0	0	0	28.75	1	0	0	1	0	0	1	1	0
25	29	2562	3	8.7	1	1	5	1	17.08	1	11	2	77.26	1	0	1	1	1	1	1	1	0
26	28	2565	3	6.9	1	1	5	1	14.80	1	11	2	98.57	1	0	1	1	1	1	1	1	0
27	29	2560	3	8.7	1	1	5	1	22.58	1	11	2	30.24	1	0	1	1	1	1	1	1	0
28	30	2568	3	5.2	2	1	5	3	14.92	0	0	0	92.33	1	0	1	1	1	1	1	1	0
29	28	2568	2	10.5	3	2	5	3	25.52	0	0	0	74.85	1	0	1	1	1	1	1	1	0
30	28	2562	2	24.9	3	2	5	3	28.32	0	0	0	20.30	1	0	1	1	1	1	1	1	0

C1: Temperatura máxima (°C); C2: Altitud (m); C3: Exposición; C4: Pendiente (%); C5: Posición topográfica; C6: Forma de terreno; C7: Vegetación predominante; C8: Forma de vida predominante; C9: Carga de combustible (ton/ha); C10: Área con/sin incendio; C11: Afectación por incendio (ha); C12: Número de incendios; C13: Vías de acceso (m); C14: Ecoturismo; C15: Caza ilegal; C16: Quema agrícola; C17: Pastoreo; C18: Proximidad a poblaciones; C19: Quema de basura; C20: Vandalismo; C21: Negligencia; C22: Prácticas de prevención de incendios.

De la información, sobresale también que, en los pesos de importancia asignados a los criterios (W), dos de ellos tienen una gran concentración: el criterio temperatura máxima (C1), criterio correspondiente a la categoría de criterios climatológicos, con un 20%; y el criterio prácticas de prevención de incendios (C22), criterio correspondiente a la categoría de criterios antrópicos, con otro 20%. Asimismo, se observa que ningún sitio optimiza todos los valores de desempeño de los criterios, lo que implica la necesidad de una solución de compromiso, entendida ésta como la solución más cercana a la ideal (Romero, *et al.*, 2015).

Siguiendo la metodología PROMETHEE, y haciendo uso de la versión 4.3 del software Smart Picker Pro (2019) ©, se estimaron los flujos unicriterio netos para cada sitio y se presentan en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Flujos unicriterio netos

Sitio	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22
1	0.724	-0.517	0.793	0.931	0.828	0.621	0.828	0.345	1.000	0.517	0.103	0.207	0.379	0.103	0.828	0.414	0.828	0.414	0.414	0.103	0.103	0.690
2	0.724	0.310	0.793	0.759	0.828	0.621	0.828	0.483	0.724	0.517	0.103	0.207	0.172	0.103	0.828	0.414	0.828	0.414	0.414	0.103	0.103	0.690
3	0.103	0.655	0.793	0.862	1.000	0.966	0.828	0.828	0.655	0.517	0.103	0.207	0.793	0.103	0.828	0.414	0.828	0.414	0.414	0.103	0.103	0.690
4	0.103	0.586	0.034	0.655	-0.517	0.621	0.828	0.483	0.172	0.517	0.517	0.517	0.724	0.931	0.828	0.414	0.828	0.414	0.621	0.931	0.931	0.345
5	0.621	0.724	1.000	0.759	-0.517	0.621	0.828	0.483	1.000	0.517	0.517	0.517	0.448	0.931	0.828	0.414	0.828	0.414	0.621	0.931	0.931	0.345
6	0.724	0.276	0.793	1.000	0.828	0.621	0.828	0.828	0.241	0.517	0.517	0.517	0.586	0.931	0.828	0.414	0.828	0.414	0.621	0.931	0.931	0.345
7	0.724	0.379	0.034	0.310	0.069	0.034	0.000	0.483	0.862	0.517	0.724	0.724	0.241	0.103	0.207	0.414	0.207	0.414	0.414	0.103	0.103	0.690
8	0.621	0.655	0.034	0.759	0.724	0.655	0.000	0.345	0.310	0.517	0.724	0.724	0.862	0.103	0.207	0.414	0.207	0.414	0.414	0.103	0.103	0.690
9	0.621	0.448	0.034	0.759	0.724	0.655	0.000	0.345	0.034	0.517	0.724	0.724	0.724	0.103	0.207	0.414	0.207	0.414	0.414	0.103	0.103	0.690
10	0.103	0.103	0.034	0.138	0.069	0.034	0.000	0.345	0.448	0.517	0.517	0.517	1.000	0.103	0.207	0.414	0.207	0.414	0.621	0.103	0.103	0.345
11	0.103	0.172	0.034	0.103	0.069	0.655	0.000	0.345	0.517	0.517	0.517	0.517	0.931	0.103	0.207	0.414	0.207	0.414	0.621	0.103	0.103	0.345
12	0.621	0.034	0.034	1.000	0.724	0.034	0.000	0.483	0.034	0.517	0.517	0.517	0.586	0.103	0.207	0.414	0.207	0.414	0.621	0.103	0.103	0.345
13	0.724	-0.931	0.034	0.414	-0.517	0.034	0.414	0.483	0.586	0.517	0.931	0.724	0.379	0.103	0.207	0.621	0.207	0.621	0.414	0.103	0.103	0.345
14	0.621	1.000	0.793	0.103	0.310	0.655	0.414	0.483	0.103	0.517	0.931	0.724	0.655	0.103	0.207	0.621	0.207	0.621	0.414	0.103	0.103	0.345
15	0.103	0.862	0.034	0.759	0.310	0.655	0.414	0.483	0.655	0.517	0.931	0.724	0.103	0.103	0.207	0.621	0.207	0.621	0.414	0.103	0.103	0.690
16	0.621	0.586	0.034	0.138	-0.517	0.621	0.414	0.828	0.793	0.517	0.517	0.517	0.103	0.103	0.207	0.621	0.207	0.621	0.621	0.103	0.103	0.690
17	0.724	0.793	0.034	0.414	0.069	0.034	0.414	0.345	0.310	0.517	0.517	0.517	0.172	0.103	0.207	0.621	0.207	0.621	0.621	0.103	0.103	0.690
18	0.103	0.724	0.034	0.759	0.724	0.655	0.414	0.345	0.172	0.517	0.517	0.517	1.000	0.103	0.207	0.621	0.207	0.621	0.621	0.103	0.103	0.690
19	0.621	0.931	0.034	0.483	0.069	0.034	-0.414	0.483	0.103	0.517	0.517	0.724	0.517	0.103	0.207	0.414	0.207	0.414	0.414	0.103	0.103	0.345
20	0.621	0.793	0.034	0.414	0.724	0.034	-0.414	0.483	0.793	0.517	0.517	0.724	0.310	0.103	0.207	0.414	0.207	0.414	0.414	0.103	0.103	0.345
21	0.724	1.000	0.034	0.759	0.724	0.655	-0.414	0.345	0.517	0.517	0.517	0.724	0.448	0.103	0.207	0.414	0.207	0.414	0.414	0.103	0.103	0.345

22	0.103	0.517	0.931	0.310	0.828	0.966	-0.414	0.483	0.241	0.517	0.517	0.517	0.862	0.103	0.207	0.414	0.207	0.414	0.621	0.103	0.103	0.345
23	0.621	0.276	0.931	0.483	-0.517	0.621	-0.414	0.483	0.379	0.517	0.517	0.517	0.034	0.103	0.207	0.414	0.207	0.414	0.621	0.103	0.103	0.345
24	0.724	0.862	0.931	0.310	0.069	0.621	-0.414	0.483	0.586	0.517	0.517	0.517	0.793	0.103	0.207	0.414	0.207	0.414	0.621	0.103	0.103	0.345
25	0.103	0.310	0.034	0.138	0.724	0.655	0.828	0.483	0.448	0.517	0.310	0.207	0.241	0.103	0.207	0.621	0.207	0.621	0.414	0.103	0.103	0.345
26	0.621	-0.172	0.034	0.414	0.724	0.655	0.828	0.483	0.931	0.517	0.310	0.207	0.517	0.103	0.207	0.621	0.207	0.621	0.414	0.103	0.103	0.345
27	0.103	0.448	0.034	0.138	0.724	0.655	0.828	0.483	0.379	0.517	0.310	0.207	0.655	0.103	0.207	0.621	0.207	0.621	0.414	0.103	0.103	0.345
28	0.724	0.069	0.034	0.759	0.310	0.655	0.828	0.828	0.862	0.517	0.517	0.517	0.310	0.103	0.207	0.621	0.207	0.621	0.414	0.103	0.103	0.345
29	0.621	0.069	0.759	0.103	0.069	0.034	0.828	0.828	0.724	0.517	0.517	0.517	0.034	0.103	0.207	0.621	0.207	0.621	0.414	0.103	0.103	0.345
30	0.621	0.310	0.759	0.586	0.069	0.034	0.828	0.828	0.931	0.517	0.517	0.517	0.931	0.103	0.207	0.621	0.207	0.621	0.414	0.103	0.103	0.345

El cuadro 5 muestra los flujos globales positivos, negativos y netos para cada sitio, así como su priorización de menor a mayor susceptibilidad a incendios.

Cuadro 5. Flujos globales y priorización de los sitios de menor a mayor susceptibilidad a incendios

Sitio	Flujos Positivos	Flujos Negativos	Flujos Netos	Posición
8	0.51724	0.13345	0.38379	1
16	0.47862	0.17172	0.3069	2
9	0.42207	0.22862	0.19345	3
26	0.37379	0.21483	0.15897	4
23	0.3631	0.22103	0.14207	5
15	0.40828	0.26793	0.14034	6
5	0.41931	0.28552	0.13379	7
4	0.41931	0.28862	0.13069	8
12	0.32621	0.24138	0.08483	9
18	0.3631	0.30207	0.06103	10
1	0.37897	0.33552	0.04345	11
3	0.37345	0.34552	0.02793	12
14	0.31448	0.28966	0.02483	13
10	0.29966	0.29138	0.00828	14
11	0.29345	0.29793	-0.00448	15
2	0.34655	0.36000	-0.01345	16
17	0.32379	0.34448	-0.02069	17
19	0.27345	0.30793	-0.03448	18
6	0.34621	0.38276	-0.03655	19
29	0.27897	0.31690	-0.03793	20
20	0.26414	0.31483	-0.05069	21
25	0.26759	0.34034	-0.07276	22
28	0.24552	0.35138	-0.10586	23
22	0.23138	0.37552	-0.14414	24
7	0.26069	0.40931	-0.14862	25
30	0.21138	0.38586	-0.17448	26
21	0.20241	0.40000	-0.19759	27
27	0.18069	0.42862	-0.24793	28
13	0.16828	0.44103	-0.27276	29
24	0.16276	0.44069	-0.27793	30

3.6 DISCUSIÓN

De acuerdo con las estimaciones obtenidas mediante la metodología PROMETHEE, los cinco sitios más susceptibles a la ocurrencia de incendios se muestran en la Figura 6. Las áreas de cada rectángulo representan el resultado de multiplicar del flujo unicriterio neto por el peso respectivo, esto es, el nivel de superación neto ponderado de cada sitio. De este modo, por ejemplo, en el sitio más susceptible a incendios (24), el criterio de mayor influencia es el criterio temperatura máxima (C1), cuyo flujo unicriterio neto es de -0.724 (Cuadro 3), y al ser multiplicado por su peso (0.2) nos da el valor del rectángulo naranja (-0.1448). Una característica de estos sitios es que todos muestran flujos netos globales negativos, esto es, la suma de los valores correspondientes a los rectángulos bajo cero es superior a la de los rectángulos por encima de cero.

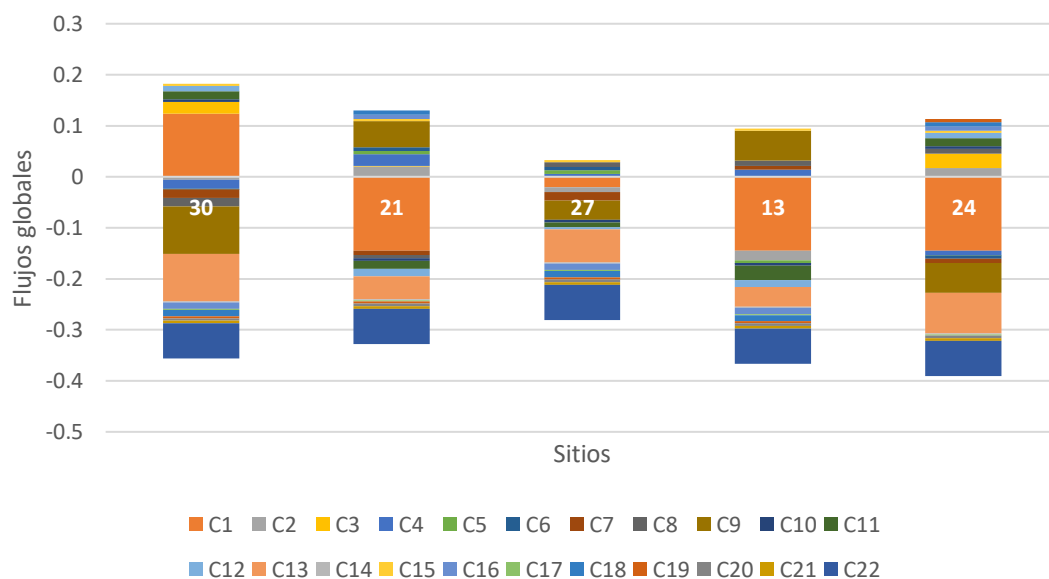


Figura 6. Los cinco sitios con mayor susceptibilidad a incendios, ordenados de menor a mayor susceptibilidad

Por otra parte, los sitios de menor susceptibilidad a los incendios se muestran en la Figura 7. Contrario a los sitios de mayor susceptibilidad, todos éstos muestran flujos globales positivos netos. De acuerdo con lo expresado por el Flujo Global Neto, el sitio mejor evaluado es el número 8 (0.38379, Cuadro 5). Esta alta valoración se

debe a que dos de sus criterios (C1: Temperatura máxima y C22: Prácticas de prevención de incendios) tuvieron un mejor desempeño y a su vez coinciden con los criterios que tienen el mayor peso de importancia (0.2 cada uno).

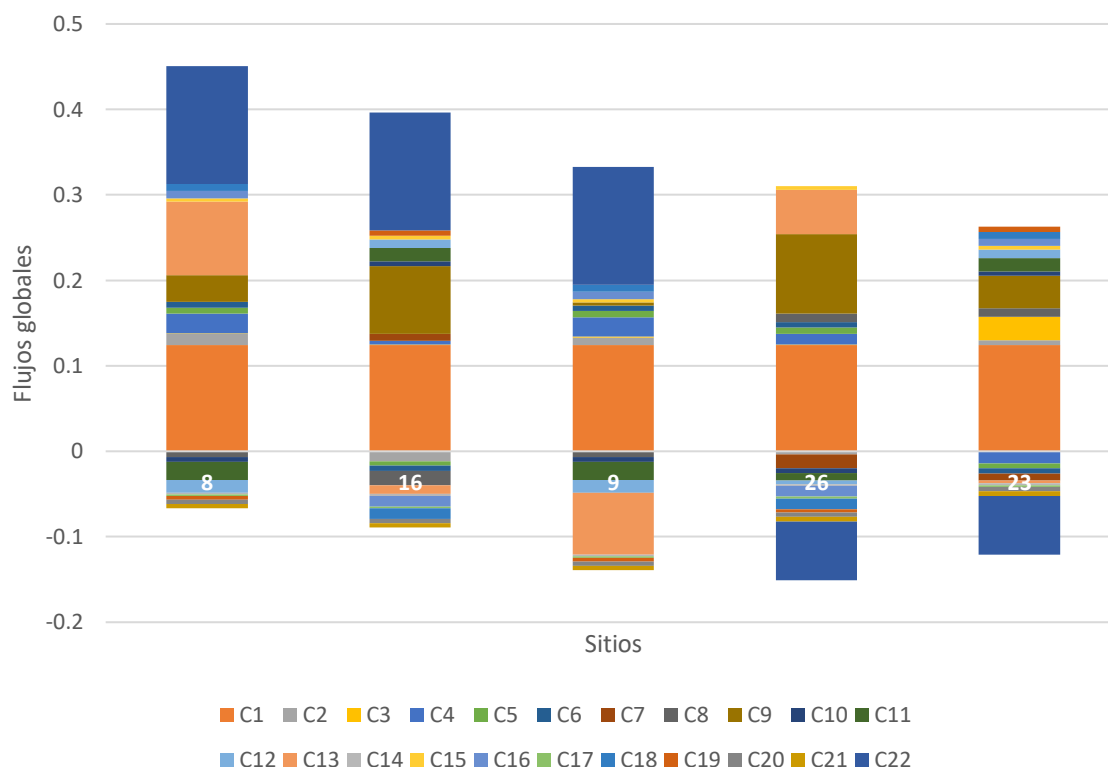


Figura 7. Los cinco sitios con menor susceptibilidad a incendios, ordenados de menor a mayor susceptibilidad.

Con la idea de identificar la localización exacta de los sitios considerados en el análisis, en la Figura 8 se presenta un mapa generado mediante el software ArcGis 10.4.1 ©. En éste se incluyen los tipos de vegetación predominante y se identifican con el color rojo a los cinco sitios de la Figura 6 como de alta susceptibilidad a los incendios; a los cinco sitios de la Figura 7 con color verde, como de baja susceptibilidad; y al resto con color amarillo con susceptibilidad media.

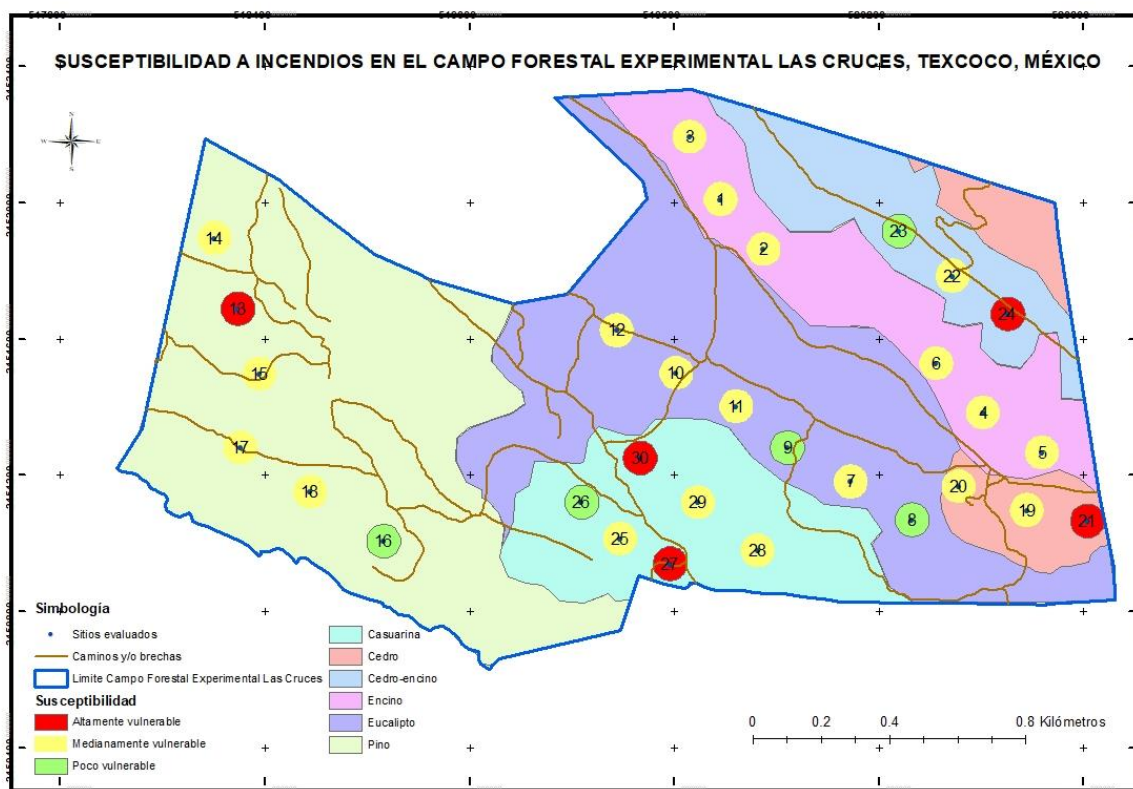


Figura 8. Susceptibilidad en el Campo Forestal Experimental las Cruces.

Aun cuando no se conocen aplicaciones del método PROMETHEE en estudios de susceptibilidad a incendios de sitios forestales, vale la pena indicar que de manera similar, en términos del objetivo de priorización y mapeo de sitios forestales basados en susceptibilidad a incendios, Esen y Avci (2018) aplicaron en Turquía el método multicriterio Proceso Analítico Jerárquico (PAJ), el cual descompone y ordena un problema de manera esquemática, en una jerarquía de prioridades utilizando la escala de Saaty para criterios cuantitativos y cualitativos (Gómez *et al.*, 2019). Otro amplio grupo de enfoques distintos de la metodología multicriterio también han abordado la susceptibilidad de sitios a incendios forestales (Sahana, 2017; de Nóbrega, *et al.*, 2018), todos ellos con objetivos parecidos.

3.7 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio usando la metodología PROMETHEE, permiten alcanzar apropiadamente los objetivos de priorización de los sitios con

base en su susceptibilidad a los incendios forestales. Asimismo, amplían las posibilidades de análisis y estudio cercano y puntual del desempeño de los distintos criterios considerados. También cabe decir que una de las limitantes de esta investigación fue la no utilización de otras funciones de preferencia contempladas en la metodología, las cuales permiten establecer umbrales de preferencia e indiferencia dando lugar al enriquecimiento de información por parte de los tomadores de decisiones en la determinación de niveles de superación entre los sitios estudiados, lo cual abre la oportunidad de análisis para futuras investigaciones en el tema.

Finalmente, consideramos de valor incluir la siguiente información: al momento de estar concluyendo la redacción del presente trabajo, en febrero 2021, se presentó un incendio forestal en el área del campo experimental las Cruces cuya ubicación geográfica corresponde al sitio No. 13, mismo que en la priorización PROMETHEE II aplicada en este estudio, resultó ser el segundo sitio con mayor susceptibilidad a incendios. Esta información, si bien no es suficiente para validar totalmente los resultados obtenidos, nos demuestra que esta integración de técnicas y metodologías permite obtener resultados útiles y confiables.

3.8 AGRADECIMIENTOS

La primera autora agradece a la Universidad Autónoma Chapingo y a Conacyt por la beca otorgada para la realización de estudios de maestría.

3.9 REFERENCIAS

Albadvi *et al.* (2007). *Assessing the impact of information technology on firm performance considering the role of intervening variables: organizational infrastructures and business processes reengineering*. International Journal of Production Research, 45(12): 2697–2734. DOI: 10.1080/00207540600767780

Athawale, Vijay; Chakraborty, Shankar (2010). Facility location selection using PROMETHEE II method. In: Proceedings of the 2010 International Conference on

Industrial Engineering and Operations Management. 9-10 January. Dhaka, Bangladesh. pp. 59-64. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/228221619_Facility_Layout_Selection_Using_PROMETHEE_II_Method (ultima consulta: 18 de octubre de 2019).

Ávila et al. (2010). *Driving factors for forest fire occurrence in Durango State of Mexico: A geospatial perspective*. *Chin. Geogr. Sci.* 20, 491–497. Recuperado de: <https://doi.org/10.1007/s11769-010-0437-x>

Brans, Jean-Pierre; De Smet, Yves (2016). Promethee methods. In: Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys. Springer (Ed). Firth edition. New York, USA. 195 p.

Brown et al. (1982). Handbook for inventorying surface fuels and biomass in the interior West. USDA, Forest Service General Technical Report INT-129. 48 p.

Carrillo et al. (2012). *Análisis espacial de peligro de incendios forestales en Puebla, México*. *Interciencia*, 37(9), 678-683.

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2019). Incendios forestales: Serie histórica de datos. Recuperado de: <https://datos.gob.mx/busca/organization/conafor> (ultima consulta: 09 de noviembre 2020)

Cruz et al. (2017). *Factores sociales de uso del suelo y vegetación asociados a los incendios forestales en Hidalgo*. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(41), 139-163.

de Nóbrega et al. (2018). Forest fire susceptibility index for assessing the history of fire occurrences in the indigenous land of Krahôlândia, Brazil. *Advances in Forestry Science*, 5(2), 325-332.

Díaz, Ignacio; González, Mauro (2016). *Análisis espacio-temporal de incendios forestales en la región del Maule, Chile*. *Bosque (Valdivia)*, 37(1), 147-158.

Esen, Fatma; Avci, Vedat (2018). Forest fire susceptibility analysis of kahramanmaras province. Journal of Social Sciences Institute/Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 8(16).

Fadlina *et al.* 2017. *Best Student Selection Using Extended Promethee II Method*. International Journal of Recent Trends in Engineering and Research. 3:21-29.

Flores *et al.* (2016). Metodología para la caracterización de condiciones propicias para incendios forestales en campo. Folleto Técnico.Núm.5 INIFAP-CIRPAC. Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco, México. 63 p.

Gómez *et al.* (2015). *Análisis del régimen de incendios forestales y su relación con los cambios de uso del suelo en la comunidad autónoma de Madrid (1989–2010)*. GeoFocus, 16, 281–304.

Gómez, Alejandro; Salas, Javier (2017). *Modelado del peligro de ignición de incendios forestales en Galicia*. Rev. Geo. Sur, 7(10), 1-14.

Hardy, C. (2005). *Wildland fire hazard and risk: Problems, definitions, and context*. Forest Ecol. Manage. 211. 73-82 pp.

Fernández *et al.* (2015). Avances y perspectivas de geomática con aplicaciones ambientales, agrícolas y urbanas. Puebla, México: BBB Biblioteca Básica de Agricultura, 274 p.

Jardel *et al.* (2006). Manejo del fuego y restauración de bosques en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manatlán, México. In: Flores G., J. G., y D. a. Rodríguez-Trejo (coords.). Incendios Forestales. Mundi Prensa, Conafor. México. pp. 254 p.

Kangas *et al.* (2001). *Outranking methods as tools in strategic natural resources planning*. Silva Fennica, 35(2), 215–227. DOI:10.14214/sf.597

Macedo, Antonia; Villegas, Isidro (2015). *Dinámica de la cobertura vegetal mediante sensores remotos y su relación con tres asociaciones de suelos forestales in* Memorias mesa 1ª. 7mo Congreso Internacional de Investigación en Ciencias

Básicas y Agronómicas. Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México; 64-75.

Martínez *et al.* (2009). Human-caused wildfire risk rating for prevention planning in Spain. *Journal of Environmental Management*, 90(2): 1241-1252.
<http://doi.org/fs72tp>

Moritz *et al.* (2014). Learning to coexist with wildfire. *Nature*, 515, 58-66.
<http://doi.org/10.1038/nature13946>

Muñoz *et al.* (2005) *Desarrollo de un modelo espacial para la evaluación del peligro de incendios forestales en la sierra madre oriental de México*. *Inv. Geogr.* 56: 101-117.

Muñoz, Carlos; Santana, Rogelio. (2018). *Puntos de calor en la Sierra Madre Oriental de San Luis Potosí: patrones espaciales y factores asociados*. *Madera y bosques*, 24(1), e2411565. Epub 23 de marzo de 2018. Recuperado de:
<https://doi.org/10.21829/myb.2018.2411565>

OECD, (2008). *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide*. OECD publishing.

Pausas, Javier (2019). *¿Qué Sabemos de Incendios Forestales?* CSIC, Catarata. España. 199 p.

Pérez *et al.* (2013). *Análisis espacio-temporal de la ocurrencia de incendios forestales en Durango, México*. *Madera y Bosques* 19(2):37-58.

Pompa, Marín; Hernández, Paulino. (2012). *Determinación de la tendencia espacial de los puntos de calor como estrategia para monitorear los incendios forestales en Durango, México*. *Bosque (Valdivia)*, 33(1), 63-68.

Pyne, Stephen (2019). *Fire. A Brief History*. 2nd ed. University of Washington Press. Seattle. 216 p.

Rentería, Juan (2004) "Desarrollo de Modelos para Control de Combustibles en el Manejo de Ecosistemas Forestales en Durango" (Tesis de doctorado en ciencias con especialidad en manejo de recursos naturales). Universidad Autónoma de Nuevo León. México. 125 pp.

Rodríguez, Dante (1996). *Incendios Forestales*. Mundi Prensa, UACH. Chapingo, Edo. de Méx. 614 p.

Rodríguez, Dante (2014). *Incendios de Vegetación. Su Ecología, Manejo e Historia*. Vol. 1. Ed. C.P., UACH, Semarnat, Conafor, Conanp. México. 889 p.

Romero *et al.* (2020). *Selección de un modelo para evaluar la sostenibilidad hidroeléctrica mediante el método AHP*. Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa, 30, 117-141.

Sahana, Meheebub; Ganaie, Tariq (2017). *GIS-based landscape vulnerability assessment to forest fire susceptibility of Rudraprayag district, Uttarakhand, India*. Environmental Earth Sciences, 76(20), 676.

Schreuder *et al.* (2006). *Técnicas estadísticas para evaluación y monitoreo de recursos naturales* (No. 333.72 S2). Universidad Autónoma de Chapingo, División de Ciencias Forestales.

Scott *et al.* (2014). *Fire on Earth. An Introduction*. Wiley Blackwell. Chichester. 413 p.

Vega *et al.* (2019). *Desarrollo de un Sistema Nacional de Peligro de Incendios Forestales Para México*. In: González-Cabán, Armando; Sánchez, José J., coordinadores técnicos. Memorias del quinto simposio internacional sobre políticas, planificación y economía de los incendios forestales: servicios ambientales e incendios forestales. Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-261, (Español). Albany, CA: Departamento de Agricultura de los EE.UU., Servicio Forestal, Estación de Investigación del Pacífico Suroeste: 42-52.

WMO (2020) CLICOM. Mexico Climatological Station Network Data. World Meteorological Organization. Ginebra, Suiza.

WWF (World Wildlife Foundation), and BCG (Boston Consulting Group) (2020). *Fires, forests and the future: A crisis raging out of control?* WWF, BCG. Switzerland. 20 p.

Veza et al. (2015). *Competences-based comparison and ranking of industrial enterprises using PROMETHEE method*. Procedia Engineering, 100: 445–449. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.389

Vetschera, Rudolf; Teixeira de A., Adiel (2012). *A PROMETHEE-based approach to portfolio selection problems*. Computers and Operations Research, 39(5), 1010–1020. DOI:10.1016/j.cor.2011.06.019

Zardari et al. (2015). *Weighting methods and their effects on multi-criteria decision making model outcomes in water resources management*. Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London.