



Susceptibilidad a incendios en el Campo Forestal Experimental Las Cruces, Texcoco, México: una priorización basada en el enfoque multicriterio

Susceptibility to Fires in the Experimental Forest Field Las Cruces, Texcoco, Mexico: A Prioritization Based on the Multicriteria Approach

*Liliana Iveth Rojas Estrada,¹ José Luis Romo Lozano,²
Dante Arturo Rodríguez Trejo³ y Antonio Villanueva-Morales⁴*

Resumen

Los incendios forestales son fenómenos de gran relevancia debido a los efectos adversos que producen en el ambiente, pero también porque forman parte del balance ecológico de varios ecosistemas. La ocurrencia de incendios se relaciona con variables climáticas, ambientales, topográficas y socioeconómicas. El objetivo de esta investigación fue priorizar un conjunto de sitios forestales con base en su susceptibilidad a incendios en el Campo Forestal Experimental Las Cruces, Texcoco, México. Se utilizó el método multicriterio PROMETHEE II tomando en cuenta indicadores considerados de mayor importancia en la incidencia de incendios. La información se obtuvo de registros en campo, bases de datos, cartografía y entrevistas a expertos en temas de incendios. Como resultado, en un mapa se identificaron

¹ Estudiante de Maestría en Ciencias Forestales por la Universidad Autónoma Chapingo, México. Líneas de interés: ciencias forestales. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1312-4454>. Correo electrónico: erli2191@outlook.es

² Autor de correspondencia. Doctorado en Forestry and Environmental Studies por Yale University, Estados Unidos. Profesor-investigador de la Universidad Autónoma Chapingo, México. Líneas de interés: economía ambiental, economía forestal, análisis multicriterio. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1256-591X>. Correo electrónico: jlromo@aya.yale.edu

³ Doctorado en Recursos Forestales y Conservación por la Universidad de Florida, Estados Unidos. Profesor-investigador de la Universidad Autónoma Chapingo, México. Líneas de interés: manejo del fuego, ecología del fuego, semillas forestales, viveros forestales y restauración de ecosistemas forestales. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1407-8365>. Correo electrónico: dantearturo@yahoo.com

⁴ Doctorado en Estadística por Iowa State University, Estados Unidos. Profesor-investigador de la Universidad Autónoma Chapingo, México. Líneas de interés: modelos lineales generalizados mixtos, diseño y análisis de experimentos, análisis de datos categóricos. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8802-0625>. Correo electrónico: antoniov28@gmail.com



cinco sitios de alta susceptibilidad, veinte de media y cinco de baja. Los criterios con mayor peso de importancia fueron: temperatura máxima anual (20 %), prevención de incendios (20 %), carga de combustible (10 %) y distancia a vías de acceso (10 %). La metodología permitió el aprovechamiento apropiado de la información generada sobre las causas potenciales de incendios. El análisis de sensibilidad demostró que la priorización con base en la susceptibilidad de los sitios a los incendios es consistente y sólida.

Palabras clave: incendios; multicriterio; PROMETHEE II; priorización; susceptibilidad.

Abstract

Forest fires are phenomena of great relevance due to the adverse effects they produce on the environment, while they are part of the ecological balance of various ecosystems. The occurrence of fires is related to climatic, environmental, topographical, and socioeconomic variables. The objective of this research was to prioritize a set of forest sites based on their susceptibility to fires in the Experimental Forest Field Las Cruces, Texcoco, Mexico. We used the PROMETHEE II multicriteria method, considering indicators of importance in the incidence of fires. We obtained the information from field records, databases, cartography, and interviews with experts on fire issues. As a result, we identified five high susceptibility sites, twenty medium and five low susceptibility sites on a map. The criteria with the greatest weight of importance were maximum annual temperature (20 %), fire prevention (20 %), fuel load (10 %), and distance to access roads (10 %). The methodology allowed the appropriate use of the information generated on the potential causes of fires. Sensitivity analysis showed that prioritization based on fire susceptibility is consistent and robust.

Keywords: fires; multicriteria; PROMETHEE II; prioritization; susceptibility.

Introducción

Los incendios forestales han sido objeto de estudio en gran parte del mundo; el interés creciente se debe a las pérdidas naturales, materiales y humanas que producen (Gómez-Pazo y Salas, 2017). No obstante, estos siniestros



conforman un proceso vital y esencial para muchos ecosistemas forestales; por ejemplo, en la sucesión ecológica y mantenimiento de la estabilidad de los ecosistemas, donde el fuego ha estado presente por más de 400 millones de años (Scott *et al.*, 2014; Pyne, 2019; Pausas, 2020). La relación del fuego con el ecosistema es conocida como régimen de fuego. Éste tiene que ver con la intensidad, severidad, estacionalidad, y escala espacial; en otras palabras, el fuego en un ecosistema posee un patrón específico y atributos (Gutiérrez *et al.*, 2015). Los regímenes de fuego han evolucionado a través de la historia, su alteración provoca cambios globales que afectan a la biósfera, por lo que tal alteración es la tercera causa de la pérdida y degradación de grandes extensiones de terrenos forestales (Moritz *et al.*, 2014; Gómez-Nieto *et al.*, 2015).

El mal uso del fuego en el sector agrícola, así como los fuegos ocasionados por el cambio de uso de suelo para la ganadería o la urbanización, aunado a las condiciones climáticas extremas con aumento de la temperatura y sequías por efecto del cambio climático, han contribuido a un aumento en 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 (IPCC, 2007). En la actualidad, a nivel global, 75 % de los incendios forestales son originados por el ser humano, además de que el cambio climático está exacerbando el comportamiento del fuego (Torres-Rojo, 2020); por ejemplo, un número menor de incendios forestales ocurren, pero son de mayor extensión (WWF y BCG, 2020). De acuerdo con las estadísticas de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2019), en México se han registrado aproximadamente 7 500 incendios que han afectado 300 000 ha de pastos y arbustos.

En México, los estudios sobre ocurrencia de incendios forestales abarcan diversos enfoques, entre los que destacan: 1) generación de índices de peligrosidad mediante el uso de percepción remota (Muñoz-Robles *et al.*, 2005; Carrillo *et al.*, 2012); 2) patrones de distribución espacial y temporal (Ávila *et al.*, 2010; Pompa y Hernández, 2012; Pérez-Verdín *et al.*, 2013; Díaz y González, 2016); 3) sistema de predicción de peligro de incendios forestales (Vega-Nieva *et al.*, 2019); 4) modelos de probabilidad mediante el uso de regresión logística (Cruz *et al.*, 2017); 5) determinación de puntos de calor para el monitoreo de incendios forestales (Pompa y Hernández, 2012; Muñoz-Robles y Santana Arias, 2018), y 6) análisis multicriterio en sistemas de información geográfica (Rentería, 2004; Muñoz-Robles *et al.*, 2005).

El análisis de incendios forestales ha sido abordado a la luz de conceptos que buscan evaluar, localizar y advertir anticipadamente su ocurrencia. Entre los más usados se encuentra el riesgo, el cual se define como la probabilidad de ocurrencia de un incendio debido a la interrelación y



exposición a factores causantes del siniestro (Hardy, 2005). El concepto de vulnerabilidad, asociado mayormente a los factores que evidencian peligro de incendio, puede entenderse como la predisposición de un área forestal a ser afectada por un incendio debido a fenómenos naturales o acciones antrópicas. Por tanto, la evaluación de la vulnerabilidad contribuye al conocimiento del riesgo mediante el análisis de las interacciones de los factores que pueden determinar la presencia de un incendio (Tuček y Majlingová, 2009).

Asimismo, el concepto de susceptibilidad se ha usado con un significado similar al de riesgo; sin embargo, el primero se define como la característica intrínseca de la vegetación, dada principalmente por las cargas de combustible, su disposición y el grado de combustibilidad que poseen, lo que finalmente le confiere la probabilidad de sufrir daños, o bien resistir y recuperarse de un incendio. Otros autores como Ghorbanzadeh y colaboradores (2019) han abordado los tres conceptos mencionados como complementarios en el contexto de análisis de incendios forestales, tal como se evidencia en la siguiente cita: “Nuestro estudio consideró tanto las vulnerabilidades sociales como el mapa de susceptibilidad a los peligros naturales, lo que resultó en una evaluación más completa del riesgo de incendios forestales en el área de estudio”. En el presente estudio, el concepto de susceptibilidad se utiliza para identificar los factores que, de acuerdo con la literatura y experiencia de expertos en el tema, permitan el uso de un método multicriterio para la clasificación de sitios con base en el mayor o menor riesgo de incendio.

La ocurrencia de incendios forestales está estrechamente ligada a diversos factores; informarse sobre éstos hace posible el uso de varios métodos comprendidos en el análisis multicriterio para la toma de decisiones dirigida a evitarlos o paliarlos. La lista de éstos es muy amplia y, como lo señalan Abrishamchi y colaboradores (2005), la selección de un método multicriterio apropiado constituye en sí un problema multicriterio. Entre los métodos aplicados al análisis de incendios forestales sobresalen el de suma lineal ponderada, que asume la agregación simple de los valores en los criterios, multiplicado por los pesos de importancia respectivos (Abarca y Quiroz, 2005; León Villalobos *et al.*, 2014). Otro método frecuentemente utilizado es el de proceso de análisis jerárquico que, entre sus características importantes considera las prioridades de cada criterio estableciendo una escala de importancia del 1 al 9 (1 = igual, 3 = moderadamente, 5 = fuertemente, 7 = muy importante, 9 = extremadamente), proveyendo a los usuarios la capacidad de comparar diferentes unidades dentro de una jerarquía (Kumari y Pandey, 2020).



El método TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) también es frecuente en los análisis de incendios (Sari, 2021) el cual, mediante transformaciones de los valores en los indicadores de cada alternativa, establece una solución ideal positiva y otra ideal negativa, para luego, con base en las distancias entre éstas, encontrar las mejores soluciones. Sin embargo, hasta ahora la literatura no reporta el uso del método multicriterio PROMETHEE II (Preference Ranking Organization Method for Enriched Evaluation) propuesto por Brans y Vincke (1985).

Entre las principales características que diferencian al método PROMETHEE II, de los anteriormente mencionados, se encuentra el uso de la relación de superación (outranking), que se define a partir de comparaciones pareadas de todos los valores correspondientes a cada indicador en cada alternativa considerada. Cuando la superioridad o preferencia en las comparaciones se ha establecido, éstas se contabilizan para cada alternativa determinando su clasificación. Una de las razones para el uso de PROMETHEE en este estudio es que, aparte de ser una alternativa multicriterio distinta a las comúnmente utilizadas en el análisis de incendios forestales, ha sido aplicada exitosamente en una variedad de problemas multicriterio, como la selección de alternativas (Vetschera y Teixeira, 2012; Fadlina *et al.*, 2017), localización de aeropuertos (Sennaroglu y Celebi, 2018), priorización de grupos de opciones (Veza *et al.*, 2015) y toma de decisiones financieras (Albadvi *et al.*, 2007). 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, Texcoco, México, utilizando el método PROMETHEE II.

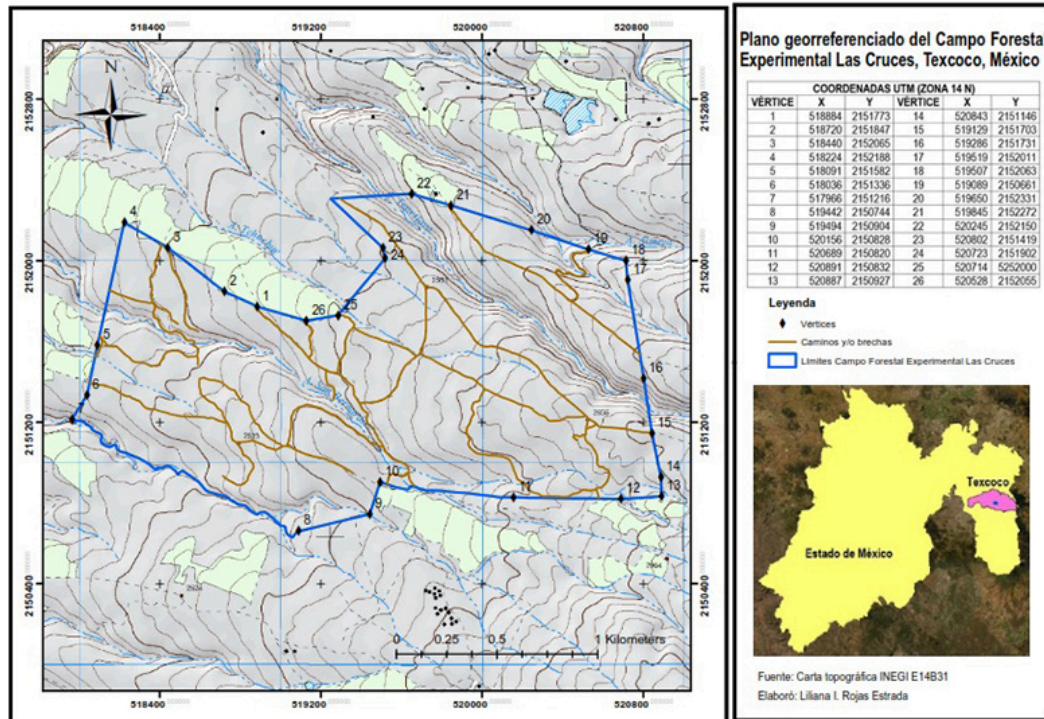
Métodos

Área de estudio

El Campo Forestal Experimental Las Cruces (CFEC), perteneciente a la Universidad Autónoma Chapingo, está ubicado en la región oriente del Estado de México y centro sur del municipio de Texcoco. Geográficamente, el CFEC 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 de entre 2 480 y 2 640 msnm (Macedo y Villegas, 2015). El campo 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 1).



Figura 1. Ubicación del Campo Forestal Experimental Las Cruces, Texcoco, México



Fuente: elaboración propia con base en Carta topográfica E14B31 (INEGI, 2014).

De acuerdo con datos vectoriales proporcionados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2008), el área presenta un tipo de clima C(Wo)(W)bg, el cual se describe como templado subhúmedo, con regímenes de lluvias de 700 mm en verano; temperatura media anual entre 12 y 18 °C con sequía intraestival en el mes de agosto y una oscilación térmica menor de 5 °C, de acuerdo con el sistema de Köppen modificado por García (1973). De acuerdo con el sistema de clasificación FAO-ISRIC-SICS (1998), se identifican tres unidades de suelo que se distribuyen en asociaciones, formando seis unidades cartográficas. Las unidades de suelo corresponden a Feozem (Hh+1/2), Leptosol (I+Hh/2) y Cambisol (Be+1/2), mismas que se desarrollan en diferentes tipos de vegetación (Macedo y Villegas, 2015).

El CFEC se localiza a una distancia de entre 1 400 a 2 000 m de las áreas pobladas más cercanas y está rodeado de zonas agrícolas. En los últimos años ha presentado un nivel notable de degradación ambiental a causa de la urbanización que le rodea, la deforestación y los incendios forestales; situación que ha disminuido la capacidad del CFEC para brindar servicios ambientales. La vegetación está conformada principalmente por



plantaciones de especies establecidas con fines de restauración y reforestación. No se realizan aprovechamientos maderables y, de acuerdo con los datos vectoriales de INEGI en la carta de uso de suelo y vegetación, la zona se identifica como bosque cultivado.

Anualmente, en el CFEC se realizan prácticas de prevención de incendios como quemas controladas, brechas cortafuego, y acomodo de materiales combustibles, con el fin de disminuir la incidencia y las áreas afectadas; sin embargo, año con año se siguen presentando incendios cuyos factores determinantes no están identificados claramente. En este sentido, es de esperarse que algunas de las actividades antrópicas sean las causas principales del inicio de tales incendios. Sus efectos negativos en las obras de restauración y reforestación no permiten un desarrollo pleno de plantaciones con especies sensibles al fuego, aun cuando existen especies dependientes del fuego. Debido a que el CFEC no cuenta con vigilancia constante, los habitantes de los alrededores realizan caminatas matutinas, recorridos en bicicleta en la estación y lo utilizan como paso para llegar a zonas agrícolas o de pastoreo que la rodean; además, se han encontrado cartuchos de bala de escopeta, por lo que se infiere la práctica de actividades de tiro o caza ilegal.

La relevancia de este estudio radica en que el CFEC es un recurso clave en la región por los servicios ambientales que provee y por las prácticas de enseñanza e investigación que en él se realizan. Asimismo, el tiempo y recursos limitados hacen necesaria la ubicación de las áreas prioritarias por su susceptibilidad a incendios para dirigir y administrar, de mejor manera, los esfuerzos de atención a la problemática de los incendios forestales.

Identificación de criterios de ocurrencia de incendios

Los criterios asociados a la ocurrencia de incendios en el CFEC se identificaron a través de revisión de literatura, recorridos de campo y entrevistas a expertos. La revisión tomó como base los trabajos de Rodríguez-Trejo *et al.* (2008) y Carrillo *et al.* (2012), y sirvió para definir 42 criterios distribuidos en cuatro categorías: climatológicas, topográficas, susceptibilidad de la vegetación a incendios, y socioeconómicas. Los recorridos de campo, realizados en agosto de 2019 y enero de 2020, fueron útiles para observar los criterios identificados en el paso anterior. Finalmente, con el objetivo de complementar y finalizar la identificación de los criterios, se realizaron entrevistas a dos expertos en incendios forestales de Protectora de Bosques del Estado de México (PROBOSQUE), a tres profesores investigadores de la Universidad Autónoma Chapingo y al ingeniero responsable operativo del CFEC. Como resultado, la lista de criterios se redujo a 22 (Cuadro 1); 20 criterios se eliminaron porque no presentaron variación en los sitios y, por lo tanto, no influyen en la priorización.



Cuadro 1. Criterios potencialmente asociados a la ocurrencia de incendios en el Campo Forestal Experimental Las Cruces, Texcoco, México

Categoría	Criterio	Unidad de medida*	Clave
Climatológicas	Temperatura máxima anual	°C	c1
	Altitud	msnm	c2
Topográficas	Exposición	sur (1)*, sureste (2), cenital (3), este (3), oeste (3), noreste (4), noroeste (4), norte (5)	c3
	Pendiente	%	c4
	Posición topográfica	valle (1), llanura (2), ladera baja (3), media (4), alta (5), escarpadura (6)	c5
	Forma del terreno	plana (1), ondulada (2), convexa (3), compleja (4)	c6
Susceptibilidad de la vegetación a incendios	Unidad vegetal predominante	encino (1), pino (2), eucalipto (3), cedro (4), casuarina (5)	c7
	Forma de vida dominante	árbol (1), arbusto (2), hierba (3), pasto (3)	c8
	Carga de combustible total	t·ha ⁻¹	c9
	Área con incendio/ sin incendio	presencia (1) / ausencia de evidencia (0)	c10
	Afectación por incendio forestal	Hectárea	c11
	Recurrencia	Núm. de incendios forestales (1, 2, 3)	c12
Antrópicos	Distancia a vías de acceso primarias y secundarias	m	c13
	Ecoturismo	presencia (1) / ausencia de evidencia (0)	c14
	Caza ilegal	presencia (1) / ausencia de evidencia (0)	c15
	Quema agrícola	presencia (1) / ausencia de evidencia (0)	c16
	Pastoreo	presencia (1) / ausencia de evidencia (0)	c17
	Proximidad a poblaciones	Distancia en (m)	c18
	Quema de basura	presencia (1) / ausencia de evidencia (0)	c19
	Vandalismo/ intencionados	presencia (1) / ausencia de evidencia (0)	c20
	Negligencia	presencia (1) / ausencia de evidencias (0) de fogatas, residuos alimenticios y basura	c21
	Prácticas de prevención de incendios	Presencia (1)/ ausencia de evidencia (0)	c22

* Los valores entre paréntesis corresponden a los posibles desempeños de los sitios en el criterio correspondiente.

Fuente: elaboración propia.



Conformación de la base de datos

Se generó una base de datos con información de los reportes de incendios forestales de la CONAFOR y los registros de PROBOSQUE para indicar la localización exacta, fecha, así como la superficie de los incendios ocurridos en el periodo 2008-2018. La información recabada se verificó y complementó con archivos vectoriales facilitados por las autoridades responsables del CFEC.

La temperatura máxima anual del periodo 1951-2010, registrada en las estaciones climatológicas próximas al área de estudio (EC-15101 San Miguel Tlaixpan y EC-15150 San Mateo Huexotla), se obtuvo de la base de datos ERIC III. Dado que algunos registros se encontraron vacíos (EC-15150 San Mateo Huexotla), se recurrió a la base de datos del sistema CLICOM de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2020). Con esta información se elaboró un mapa de isotermas con ArcGIS para homogeneizar los datos de temperatura mínima, promedio y máxima anuales en el periodo de incendio.

Con el propósito de obtener los criterios topográficos (pendiente y exposición), 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. Para los datos correspondientes a tipo de suelo, fisiografía y posición topográfica se utilizó la información referida en las cartas de edafología (INEGI escala 1: 250 000 [2017]) y fisiografía (INEGI escala 1: 1 000 000 [2000]).

Determinación de las unidades vegetales predominantes

Las unidades vegetales predominantes en el área de estudio se determinaron mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el algoritmo de máxima verosimilitud aplicados a imágenes satelitales Sentinel 2A (con fecha 02-03-2020). Estas fueron cargadas en el programa Sen2Cor para llevar a cabo la corrección atmosférica y, posteriormente, se procesaron en el programa ArcGIS 10.4.1 mediante la herramienta Image Analysis, para una clasificación supervisada de las especies que componen la cobertura vegetal del bosque cultivado. Para el cálculo del NDVI se utilizó la expresión siguiente:

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

donde:

NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada



ρ NIR: Banda de Infrarrojo cercano

ρ R: Banda del Rojo

Una vez que se definieron las áreas con cobertura vegetal mediante el NDVI, se realizó un muestreo simple aleatorio para caracterizarlas con información referente al tipo de vegetación predominante, conformación de estratos y especies.

Selección de sitios y recolección de datos para cuantificación de combustible forestal

Se llevó a cabo un muestreo estratificado (Schreuder *et al.*, 2006), donde los estratos corresponden a los aspectos siguientes:

- Unidad vegetal predominante (pino, encino, cedro, eucalipto y casuarina);
- Área con registro (reportes emitidos por CONAFOR y/o PROBOSQUE) o evidencia de incendio forestal (huellas de quemado en los troncos y restos de vegetación incendiada) durante el periodo 2008-2018;
- Área no incendiada durante el periodo 2008-2018.

De esta manera, por cada unidad vegetal predominante se seleccionó un sitio para áreas con registro o evidencia de incendio forestal y un sitio para áreas no incendiadas; se realizaron dos repeticiones, obteniendo un total de 30 sitios de muestreo. Las coordenadas se enlistan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Coordenadas en el punto central de los conglomerados muestreados para la evaluación de combustibles forestales en el Campo Forestal Experimental Las Cruces, Texcoco, Estado de México

Coordenadas UTM WGS84- 14 N		Número de conglomerado	Antecedente de incendio	Unidad vegetal predominante
X	Y			
519736	2152009	1	Incendiado	<i>Quercus</i> sp.
519862	2151862	2	Incendiado	<i>Quercus</i> sp.
519645	2152192	3	Incendiado	<i>Quercus</i> sp.
520117	2151180	4	Incendiado	<i>Eucalyptus</i> sp.
520297	2151069	5	Incendiado	<i>Eucalyptus</i> sp.
519931	2151280	6	Incendiado	<i>Eucalyptus</i> sp.
518321	2151688	7	Incendiado	<i>Pinus</i> sp.



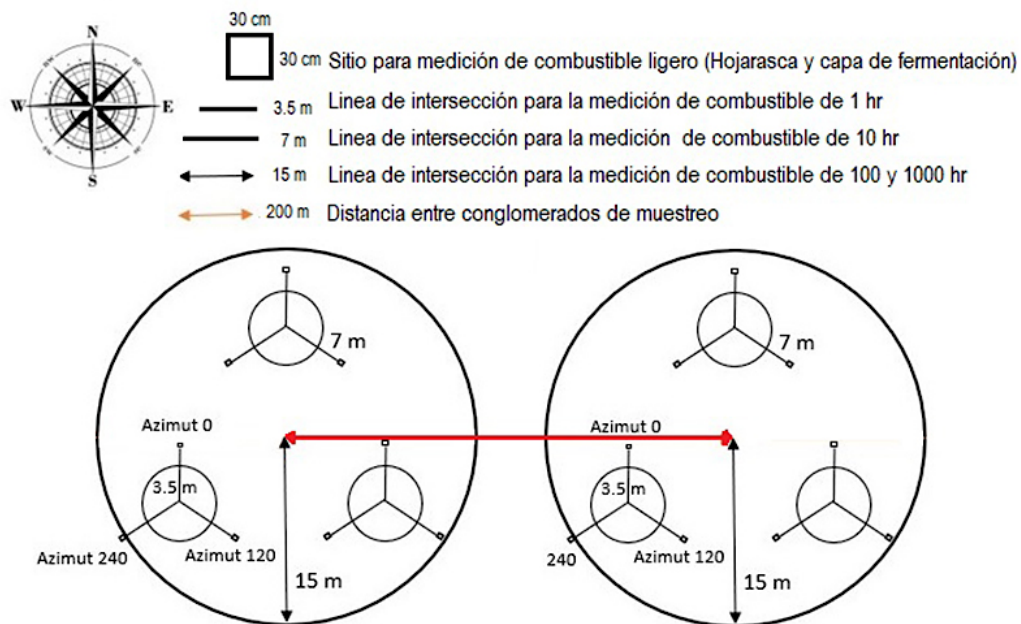
518253	2151895	8	Incendiado	<i>Pinus sp.</i>
518384	2151497	9	Incendiado	<i>Pinus sp.</i>
520634	2151097	10	Incendiado	<i>Cupressus sp.</i>
520434	2151167	11	Incendiado	<i>Cupressus sp.</i>
520811	2151065	12	Incendiado	<i>Cupressus sp.</i>
519441	2151013	13	Incendiado	<i>Casuarina sp.</i>
519329	2151120	14	Incendiado	<i>Casuarina sp.</i>
519588	2150939	15	Incendiado	<i>Casuarina sp.</i>
520505	2151383	1	No incendiado	<i>Quercus sp.</i>
520678	2151266	2	No incendiado	<i>Quercus sp.</i>
520368	2151528	3	No incendiado	<i>Quercus sp.</i>
519606	2151500	4	No incendiado	<i>Eucalyptus sp.</i>
519782	2151402	5	No incendiado	<i>Eucalyptus sp.</i>
519432	2151624	6	No incendiado	<i>Eucalyptus sp.</i>
518748	2151005	7	No incendiado	<i>Pinus sp.</i>
518329	2151280	8	No incendiado	<i>Pinus sp.</i>
518533	2151150	9	No incendiado	<i>Pinus sp.</i>
520416	2151784	10	No incendiado	<i>Cupressus sp.</i>
520258	2151915	11	No incendiado	<i>Cupressus sp.</i>
520578	2151673	12	No incendiado	<i>Cupressus sp.</i>
519845	2150979	13	No incendiado	<i>Casuarina sp.</i>
519670	2151119	14	No incendiado	<i>Casuarina sp.</i>
519500	2151249	15	No incendiado	<i>Casuarina sp.</i>

Fuente: elaboración propia.

La información sobre la temporada de mayor incidencia de incendios forestales y los datos para la cuantificación de cargas de combustible forestal se colectaron durante los meses de marzo y abril del 2020. Para ello, se requirieron los materiales siguientes: brújula, GPS, cuadro para campo con formatos, lápiz, regla, cinta métrica de 50 m, flexómetro, cuerdas de 15 m (marcadas a 3.5 y 7 m), estacas, tubos de CPVC (cloruro de polivinilo clorado) de 30 cm de longitud, bolsas de estraza, calibrador de combustibles forestales, marcador permanente y cámara fotográfica. La estrategia para la recolección de datos fue el diseño de un conglomerado de muestreo de combustibles forestales. A partir del centro del conglomerado se ubicaron tres sitios de muestreo a una distancia de 8.9 m y en ángulos de azimut 0°, 120° y 240° (Figura 2).



Figura 2. Diseño de muestreo de los conglomerados para la evaluación de combustibles forestales



Fuente: elaboración propia en base a Brown *et al.* (1982).

Posteriormente, localizado el punto central del conglomerado, se conformaron tres transectos con las siguientes características:

- 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 3.5 m 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 capas presentes (capa de hojarasca, capa de fermentación, cobertura de capa de hierbas, y cobertura de capa de pastos). Adicionalmente



en bolsas de papel estraza se colectó la hojarasca, hierbas y pastos del cuadro de muestreo. Cada muestra se etiquetó y pesó; luego se colocaron en una estufa de secado (elaboración propia). Las muestras se pesaron a las 12, 24, 48 y 72 h o hasta alcanzar un peso constante.

Las cargas combustibles forestales se estimaron con la metodología del sistema para el cálculo de combustibles forestales (SICCO) (Flores Garnica *et al.*, 2016), desarrollada por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), la cual utiliza datos de levantamientos de campo mediante la técnica de intersecciones planares como información de entrada, descrita por Brown *et al.* (1982). Este sistema se basa en dos grupos de ecuaciones; el primero se usa para la estimación de cargas de combustibles leñosos de 1, 10, 100 y 1 000 h, y se fundamentan en el conteo de las intersecciones planares (Brown *et al.*, 1982), mientras que el segundo grupo se usa para la estimación de las cargas de combustibles de la hojarasca y material en fermentación.

El sistema SICCO está desarrollado en el programa Microsoft Excel. En un archivo Excel se almacena información del sistema, secciones de entrada y salida de datos, así como los cálculos necesarios para la estimación de combustibles de acuerdo con su clasificación en 1 h, 10 h, 100 h, 1 000 h firmes, 1 000 h podridos, hojarasca, hierbas, pastos y material de fermentación. Los datos que se obtienen están expresados en $t \cdot ha^{-1}$.

Ponderación de criterios

En el contexto de incendios forestales, los criterios que influyen en su generación no tienen el mismo nivel o grado de importancia, por lo que deben someterse a la asignación de pesos (ponderación) reconociendo las diferencias de su importancia mediante valores relativos. Por lo anterior, es importante realizar un análisis crítico de los criterios involucrados, de los que, aunque no es posible eliminar completamente la subjetividad de los juicios, se puede ejercer un control mediante el contraste de opiniones argumentadas. Para ello se utilizó el método subjetivo conocido como “asignación de puntos” (OECD, 2008; Zardari *et al.*, 2015), con la participación de 5 expertos en incendios forestales. El procedimiento se realizó en dos etapas. La primera consistió en distribuir 100 puntos entre las cuatro categorías de criterios: climatológicos (20), topográficos (10), susceptibilidad de la vegetación a los incendios (20), y antrópicos (50). La segunda etapa consistió en distribuir nuevamente 100 puntos entre los criterios de cada categoría. Finalmente, los resultados fueron normalizados para obtener el peso final de cada criterio (Cuadro 3).



Cuadro 3. Distribución de pesos de importancia por criterio asociado a la ocurrencia de incendios en el Campo Forestal Experimental Las Cruces (CFEC), Texcoco, Estado de México

Categoría	Criterio	Clave	Peso
Climatológicas	Temperatura máxima anual	c1	0.2
Topográficas	Altitud	c2	0.02
	Exposición	c3	0.03
	Pendiente	c4	0.03
	Posición topográfica	c5	0.01
	Forma del terreno	c6	0.01
Susceptibilidad de la vegetación a incendios	Unidad vegetal predominante	c7	0.02
	Forma de vida dominante	c8	0.02
	Carga de combustible total	c9	0.1
	Área con antecedente de incendio	c10	0.01
	Afectación por incendio forestal	c11	0.03
	Recurrencia	c12	0.02
Antrópicos	Distancia a vías de acceso primarias y secundarias	c13	0.1
	Ecoturismo	c14	0.02
	Caza ilegal	c15	0.02
	Quema agrícola	c16	0.02
	Pastoreo	c17	0.01
	Proximidad a poblaciones	c18	0.02
	Quema de basura	c19	0.01
	Vandalismo/ intencionados	c20	0.05
	Negligencia	c21	0.05
	Prácticas de prevención de incendios	c22	0.2

Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, se identificaron los criterios cuya expresión no corresponde a variables numéricas, por lo que su información se convirtió a valores numéricos asociados a la susceptibilidad. Para todos los criterios antrópicos (excepto el de distancia a vías de acceso [c13] y el criterio antecedentes de incendio [c10]) se establecieron los valores 0 y 1 que indican, respectivamente, ausencia y presencia del concepto considerado en el criterio (ejemplo, c15 = caza ilegal); de manera similar, se asignaron valores numéricos utilizando las escalas 1, 4, 1, 6 y 1, 3 a los criterios siguientes:



- Exposición (c3): norte (5), noreste (4), cenital (3), este (3) y oeste (3).
- Posición topográfica (c5): escarpadura (6), ladera alta (5), ladera media (4), ladera baja (3), llanura (2) y valle (1).
- Forma de terreno (c6): compleja (4), convexa (3), ondulada (2) y plana (1).
- Vegetación predominante (c7): casuarina (5), cedro (4), eucalipto (3), pino (2) y encino (1).
- Forma de vida predominante (c8): pasto (3), arbusto (2) y árbol (1).
- Por otra parte, los criterios pueden ser maximizados y minimizados. Los criterios por maximizar son aquellos cuyos valores numéricos, mientras más grandes son, hacen menos susceptible la ocurrencia de incendios, tales como altitud (c2), vías de acceso (c13) y prácticas de prevención de incendios (c22). Por el contrario, los criterios por minimizar tienen valores numéricos que cuando son menores hacen menos susceptible la ocurrencia de incendios; este es el caso del resto de los criterios. En el método PROMETHEE II es necesario declarar el carácter de los criterios, ya que cuando éstos son por minimizar, las diferencias en las comparaciones pareadas se multiplican por -1 para efecto del registro correcto de la orientación del criterio y su aporte en la contabilidad de las superaciones.

Método PROMETHEE II

PROMETHEE pertenece al grupo de métodos multicriterio que se utilizan para priorizar un conjunto de alternativas evaluadas en varios criterios, con diferentes pesos de importancia. La versión PROMETHEE I provee un ordenamiento parcial de las alternativas. La versión PROMETHEE II se diferencia en que tiene la capacidad de producir un ordenamiento completo de las alternativas (Athawale y Charkroborty, 2010) a través de una matriz de decisión (Cuadro 4). El método considera principalmente tres estimaciones (Ishizaka y Nemery, 2013): grados de preferencia, flujos unicriterio, y flujos globales.



Cuadro 4. Matriz de decisión utilizada generalmente en los métodos multicriterio

W	w_1	w_2	...	w_m
A	c_1	c_2	...	c_m
a_1	$c_1(a_1)$	$c_2(a_1)$...	$c_m(a_1)$
a_2	$c_1(a_2)$	$c_2(a_2)$...	$c_m(a_2)$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
a_n	$c_1(a_n)$	$c_2(a_n)$...	$c_m(a_n)$

Notas: $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ es el conjunto de alternativas (sitios forestales) con $n = 30$. $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ es el conjunto de criterios con $m = 22$. $c_i(a_j)$ = evaluación de la alternativa a_j en el criterio c_i (desempeño de a_j en c_i), se asume que $c_i(a_j)$ es un valor numérico. $W = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$, tal que $\sum_{i=1}^m w_i = 1$, son los pesos de importancia de los criterios.

Fuente: Ishizaka y Nemery (2013).

Los grados de preferencia son denotados por (P_{ij}^k) y se estiman para cada par ordenado (a_i, a_j) en cada criterio c_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 c_k . Es un número entre 0 y 1, y es una función de la diferencia en las evaluaciones $c_k(a_i) - c_k(a_j)$. Por otra parte, (P_{ji}^k) refleja el grado de preferencia de a_j con respecto a a_i .

En el proceso de estimación de (P_{ij}^k) y (P_{ji}^k) se pueden utilizar funciones de preferencia. Brans y De Smet (2016) sugieren seis funciones, entre las cuales se encuentra la función tipo I de criterio usual utilizada en este estudio. Ésta se caracteriza por considerar que el umbral de indiferencia (q) y el umbral de preferencia (p) es cero ($q = p = 0$). Es decir que cualquier diferencia positiva entre las alternativas comparadas implica un grado de preferencia igual a 1. En cualquier otro caso, el grado de preferencia es cero. Es decir:

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

Los flujos unicriterio se calcularon en tres modalidades para todos los sitios a_i . El flujo unicriterio positivo (FUP) de a_i expresa el promedio de los grados de preferencia (o nivel de superación) del sitio i en el criterio k con respecto al resto de los sitios; el flujo unicriterio negativo (FUNeg) de a_i expresa el promedio de los grados de preferencia del resto de los sitios con respecto al sitio i en el criterio k . Los flujos unicriterio positivos y negativos se expresan en valores que van de cero a uno (Ecuaciones 2 y 3). El flujo unicriterio neto (FUN) de a_i 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) también se calculan para cada sitio a_i y toman en cuenta todos los criterios de manera simultánea. Mediante una suma ponderada se agregan todos los flujos unicriterio positivo, negativo y neto en los flujos globales usando las fórmulas 5, 6 y 7:

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

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

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

La aplicación del método PROMETHEE II implica una gran cantidad de cálculos, por lo que éstos se hicieron en el software Smart Picker Pro (2019) versión 4.3. Los valores obtenidos en los flujos globales netos determinan la priorización de los sitios y, en consecuencia, su susceptibilidad a los incendios.

Resultados y discusión

El Cuadro 5 presenta la matriz de decisión con los desempeños de los sitios en los criterios considerados de mayor influencia en la ocurrencia de incendios forestales. Los valores mostrados son el resultado de la aplicación de los procedimientos ya descritos, preparados para ser insumos en la aplicación del método PROMETHEE II.



Cuadro 5. Matriz de decisión con el desempeño de los sitios del Campo Forestal Experimental Las Cruces, Texcoco, Estado de México

Criterios Max/Min	Min	Max	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Max	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Max	
Pesos de los criterios	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

Notas: Criterios: c1: Temperatura máxima anual (°C); c2: Altitud (m); c3: Exposición (norte = 5, noreste = 4, cenital = 3, este = 3, oeste = 3); c4: Pendiente (%); c5: Posición topográfica (ladera alta = 5, ladera media = 4, ladera baja = 3, llanura = 2, valle = 1); c6: Forma de terreno (compleja = 4, convexa = 3, ondulada = 2, plana = 1); c7: Vegetación predominante (casuarina = 5, cedro = 4, eucalipto = 3, pino = 2, encino = 1), c8: Forma de vida predominante (pasto = 3, arbusto = 2, árbol = 1); c9: Carga de combustible (t·ha⁻¹); c10: Área con antecedente de incendio; c11: Afectación por incendio (ha); c12: Número de incendios; c13: Distancia a 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. En los criterios c10 y c14-c22, los valores 0 y 1 indican ausencia y presencia del concepto, respectivamente.

Fuente: elaboración propia.



Acorde con el Cuadro 5, 10 de los 22 criterios corresponden a la categoría antrópicos. Esto indica la preponderancia del factor humano que de alguna manera influye en el comportamiento del fuego cuando se realizan actividades para controlar su régimen, como las quemas prescritas, modificación de la estructura de la vegetación y de la composición vegetal de algunos ecosistemas y manejo de cargas de combustible (Bowman *et al.*, 2011; Carmenta *et al.*, 2011). Por otra parte, también se encuentran aquellos criterios humanos del lado negativo, como la presencia de asentamientos humanos en las áreas forestales, dado que, al suprimir actividades de manejo de fuego, estas áreas se convierten, a largo plazo, en paisajes inflamables con presencia humana e infraestructura asociada. Tal situación los convierte en un foco de peligro para la ocurrencia de incendios de gran magnitud que, a pesar del desarrollo de tecnología sofisticada para el combate, ocasionarán impactos ambientales (flora y fauna), económicos y aumento en la emisión de gases de efecto invernadero.

Siguiendo la metodología PROMETHEE, se estimó el grado de preferencia de cada sitio con respecto a los demás (P_{ij}^k) y el grado de preferencia de todos los sitios respecto a cada uno de éstos (P_{ji}^k), los cuales sirvieron de base para estimar los flujos unicriterio netos que se presentan en el Cuadro 6. En dicho cuadro se observan muchos valores negativos en los flujos, debido a que las estimaciones que se presentan corresponden a los flujos unicriterio netos. Los valores negativos en algún criterio significan que la condición del resto de los sitios es mejor que la del sitio en referencia.

De este modo, el sitio 1, presenta mejor condición (menor susceptibilidad a incendios) que el resto de los sitios en los siguientes criterios: vegetación predominante (c7), carga de combustible (c9), quema agrícola (c16), pastoreo (c17), proximidad a poblaciones (c18), y prácticas de prevención de incendios (c22). Esto se puede verificar al observar el valor del desempeño en el criterio c9 del sitio 1 (Cuadro 5), el cual tiene el valor más bajo de carga de combustible ($13.63 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$) y el valor 1 en el flujo unicriterio neto (Cuadro 6), lo que significa que supera la condición del resto de los sitios en este criterio. Por otra parte, en los demás criterios, la condición del sitio 1 es de mayor susceptibilidad a los incendios que el resto de los sitios.



Cuadro 6. Flujos unicriterio netos de los sitios del Campo Forestal Experimental Las Cruces, estimados mediante PROMETHEE II

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

Notas: c1: Temperatura máxima anual; c2: Altitud; c3: Exposición; c4: Pendiente; c5: Posición topográfica; c6: Forma de terreno; c7: Vegetación predominante; c8: Forma de vida predominante; c9: Carga de combustible; c10: Área con antecedente de incendio; c11: Afectación por incendio; c12: Número de incendios; c13: Distancia a vías de acceso; 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.

Fuente: elaboración propia.



El método PROMETHE II estima los flujos globales positivos, negativos y netos mediante una suma ponderada de los flujos unicriterio para cada sitio, de este modo, toma en cuenta, de manera simultánea, la condición de los sitios en todos los criterios, y el peso de importancia asignado a cada criterio (fórmulas 5, 6 y 7). El Cuadro 7 muestra la priorización de los sitios en esta última fase del método, ordenados de menor a mayor susceptibilidad a los incendios. Los sitios que ocupan las primeras 14 posiciones de menor susceptibilidad presentan un valor positivo en el flujo global neto, esto es, son los que presentan una mejor condición en los valores del conjunto de criterios, con respecto al resto de los sitios donde ocurre lo contrario, pues presentan un flujo global neto negativo.

Cuadro 7. Flujos globales y priorización de los sitios de menor a mayor susceptibilidad a incendios en el Campo Forestal Experimental Las Cruces, Texcoco, Estado de México

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



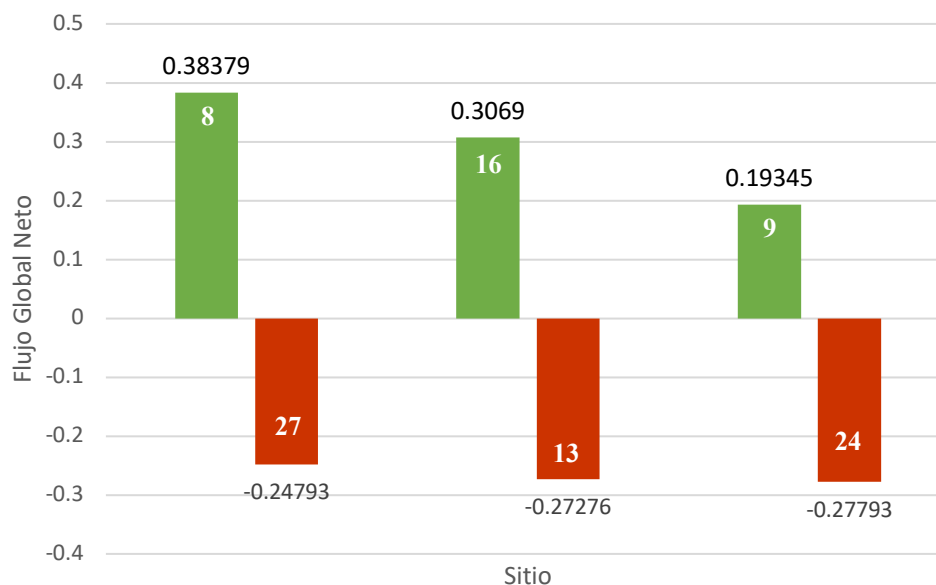
28	0.24552	0.35138	-0.10586	23
22	0.23138	0.37552	-0.14414	24
7	0.26069	0.40931	-0.14862	25
30	0.21138	0.38586	-0.17448	26
21	0.20241	0.40000	-0.19759	27
27	0.18069	0.42862	-0.24793	28
13	0.16828	0.44103	-0.27276	29
24	0.16276	0.44069	-0.27793	30

Fuente: elaboración propia.

La Figura 3 muestra los tres sitios con menor susceptibilidad a incendios, y los tres sitios con mayor susceptibilidad. El sitio más susceptible a incendios es el que registró el menor valor del flujo global neto (sitio 24). Este valor resulta de la suma ponderada, por su peso de importancia, de todos los flujos unicriterio netos (Cuadro 6). Los criterios con mayor aporte negativo a este valor son: temperatura máxima anual (c1), distancia a vías de acceso primarias (c13), prácticas de prevención de incendios (c22), y carga de combustible total (c9). Esto era de esperarse, ya que son los criterios con mayor peso de importancia. De manera similar, el sitio 8, de menor susceptibilidad a los incendios, presenta el mayor valor en el flujo global neto. Los criterios con mayor aporte son los mismos que en el sitio 24, pero ahora del lado positivo y en orden distinto: prácticas de prevención de incendios (c22), temperatura máxima anual (c1), distancia a vías de acceso primarias (c13) y carga de combustible total (c9).



Figura 3. Sitios con menor (color verde) y mayor (color rojo) susceptibilidad a incendios en el Campo Forestal Experimental Las Cruces, seleccionados con el método PROMETHEE II



Nota: Cada sitio se identifica con el número de color blanco y en cada barra se indica el valor de su flujo global neto.

Fuente: elaboración propia.

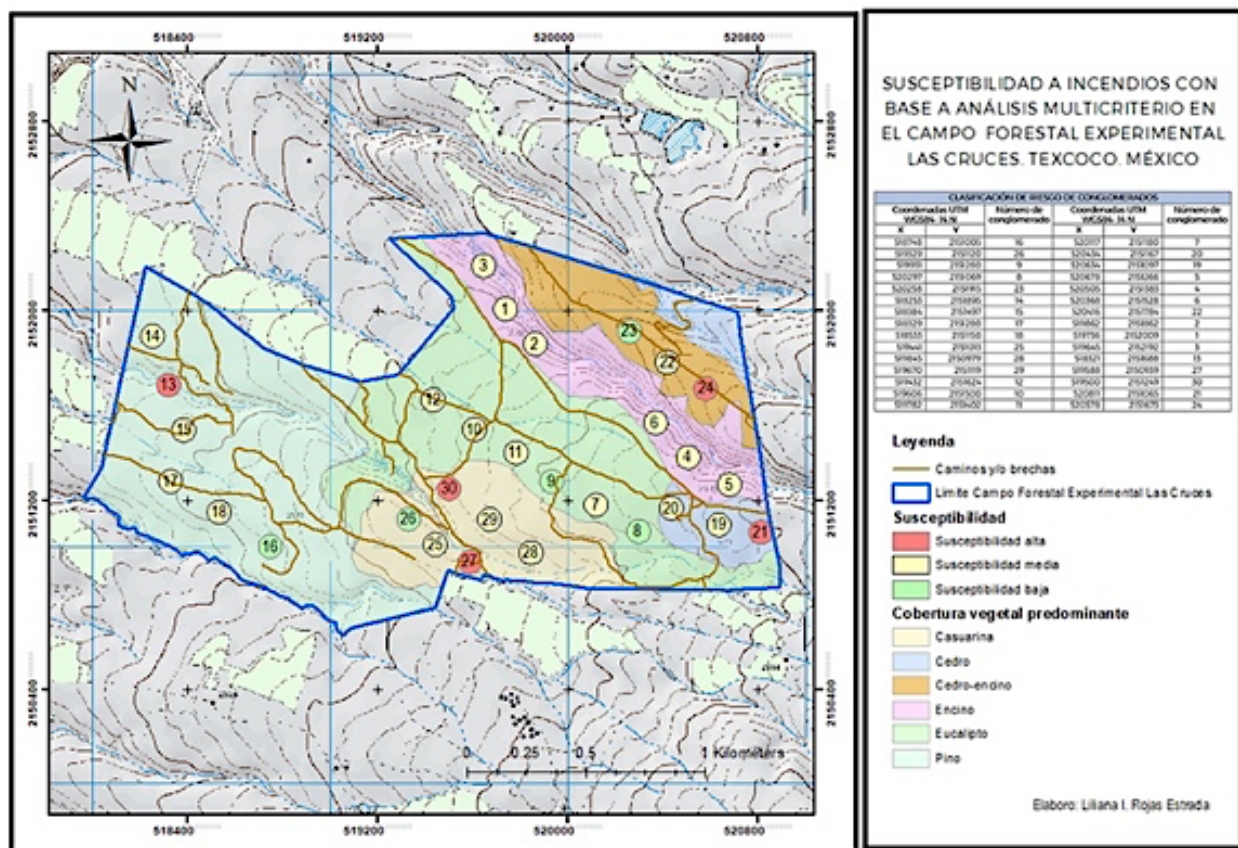
De los criterios utilizados en el presente análisis, los que se incluyen en la categoría antrópica (c13 al c22) son los que tienen la mayor posibilidad de ser manejados para reducir la susceptibilidad a los incendios forestales. Entre ellos, los más importantes, de acuerdo con el peso asignado en este estudio, son las prácticas de prevención de incendios (c22) y la distancia a las vías de acceso (c13). La atención del primero permitiría reducir la susceptibilidad mediante quemas controladas, brechas cortafuego y manejo de combustibles. Del mismo modo, al considerar el criterio c13, mediante vigilancia y control de actividades humanas frecuentes, se estaría atendiendo también buena parte del resto de los criterios antrópicos (c14 al c21). La atención de criterios de las otras categorías también puede incidir en la reducción de la susceptibilidad a los incendios, pero, generalmente, los costos económicos son más altos y el tiempo puede rebasar el corto y mediano plazo. Este es el caso de la atención del criterio carga de combustible (c9) y unidad vegetal predominante (c7). La atención al resto de los criterios presenta un mayor grado de dificultad por los recursos y tiempo que demanda. Los resultados en la Figura 3 resaltan la importancia de los cuatro



criterios que representan el 60 % del total del peso de importancia: temperatura máxima anual (c1), prácticas de prevención de incendios (c22), carga de combustible total (c9) y distancias a vías de acceso (c13).

Con el fin de obtener la localización exacta de los sitios, en la Figura 4 se muestra un mapa que incluye los tipos de vegetación predominante. Los sitios se identificaron de la manera siguiente: a los cinco sitios con los valores más bajos de flujo global neto (Cuadro 7), se les asignó el color rojo de alta susceptibilidad a los incendios; a los cinco sitios con los valores más altos se les asignó el color verde de baja susceptibilidad; y el resto con color amarillo con susceptibilidad media.

Figura 4. Susceptibilidad a incendios con base en el análisis multicriterio PROMETHEE II en el Campo Forestal Experimental Las Cruces, Texcoco, Estado de México



Fuente: elaboración propia, 2020.



Aunque no hay consenso sobre cómo determinar la calidad de un método de decisión y la fiabilidad de los resultados (Muñoz *et al.*, 2016), en el marco del análisis multicriterio con frecuencia se utiliza el análisis de sensibilidad para verificar la consistencia y solidez de las soluciones. Una de las formas de observar la sensibilidad de los resultados es variando el peso de un criterio en particular mientras el resto de los criterios comparte la variación compensatoria por igual, manteniendo la sumatoria de todos los pesos igual al 100 % (Yazdani *et al.*, 2016). En esta investigación se modificaron los pesos iniciales de los dos criterios de mayor importancia: temperatura máxima anual (c1) y prácticas de prevención de incendios (c22). Las variaciones en ambos criterios fueron de -5, +5, -10, y +10 %, y se compensaron por igual en el resto de los criterios. El efecto de las modificaciones se presenta en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Sensibilidad en el orden de priorización de los sitios ante variaciones en los pesos de importancia de los criterios temperatura máxima anual (c1) y prácticas de prevención de incendios (c22) asociados a la ocurrencia de incendios forestales

Sitios	Orden de priorización original	Efecto en el orden de priorización ante variaciones en los pesos			
		-5 %	+5 %	-10 %	+10 %
1	11.0	11.0	11.0	11.0	12.0
2	16.0	16.0	15.0	17.0	15.0
3	12.0	13.0	12.0	15.0	11.0
4	8.0	6.0	8.0	5.0	8.0
5	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
6	19.0	18.0	21.0	16.0	21.0
7	25.0	25.0	24.0	25.0	24.0
8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
9	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
10	14.0	14.0	14.0	12.0	14.0
11	15.0	15.0	16.0	14.0	16.0
12	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
13	29.0	30.0	29.0	30.0	29.0
14	13.0	12.0	13.0	13.0	13.0
15	6.0	8.0	5.0	8.0	5.0
16	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
17	17.0	17.0	17.0	18.0	17.0
18	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
19	18.0	19.0	18.0	19.0	18.0
20	21.0	21.0	20.0	21.0	20.0
21	27.0	27.0	27.0	26.0	27.0
22	24.0	24.0	25.0	24.0	25.0
23	5.0	5.0	6.0	6.0	6.0
24	30.0	29.0	30.0	29.0	30.0
25	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0



26	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
27	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0
28	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0
29	20.0	20.0	19.0	20.0	19.0
30	26.0	26.0	26.0	27.0	26.0

Fuente: elaboración propia.

En los resultados se observa que, ante la disminución del 5 % en los criterios c1 y c22, 22 de los 30 sitios se mantuvieron en la misma posición de priorización. Únicamente los sitios 4 y 15, cambiaron en +2 y -2 posiciones, respectivamente; los sitios restantes sólo se modificaron en una posición de la clasificación. Ante el incremento del 5 % en ambos criterios, se obtuvieron resultados similares: 21 sitios permanecieron sin cambio; sólo un sitio cambió dos posiciones; los 8 sitios restantes se modificaron en una posición. Los efectos resultantes de una variación significativamente mayor ($\pm 10\%$) también presentan modificaciones menores en el orden de priorización de los sitios, demostrando que los resultados obtenidos son consistentes y sólidos.

Esta investigación se propuso priorizar un conjunto de sitios forestales con base en su susceptibilidad a los incendios utilizando el método PROMETHEE II. En este esfuerzo se logró la clasificación de los 30 sitios del CFEC y, con ello, la identificación de los sitios de mayor susceptibilidad (24, 13, 27, 21 y 30), y menor susceptibilidad (8, 16, 9, 26 y 23). Aun cuando no hay reportes de aplicación del método PROMETHEE II en el ámbito de los incendios forestales, los resultados del presente estudio nos indica varias ventajas: se puede aplicar con cierta facilidad en el contexto de análisis de incendios forestales; se pueden tomar en cuenta diversos criterios con dimensiones y escalas diferentes; no dificulta la estructuración del problema; la información contenida en la matriz de desempeños se puede considerar de manera eficiente y completa en la toma de decisiones, y permite el uso de información cualitativa mediante escalas numéricas. Otros autores han tenido experiencias similares aplicando el método en otras áreas (Abedi *et al.*, 2012; Brankovic *et al.*, 2018).

No obstante, PROMETHEE II también presenta algunas desventajas (Macharis *et al.*, 2004), entre las más señaladas se encuentran el que internamente no contempla la asignación de pesos a los criterios. Del mismo modo, su proceso de estimación tiene el problema de inversión de rango (*rank reversal*), esto es, la clasificación de las alternativas puede invertirse cuando se introduce una o más alternativas; sin embargo, sobre estas limitaciones, se puede decir que no significan un gran problema ya que hay variedad de métodos para definir los pesos de los criterios y en el caso de la inversión del rango, no siempre es necesario modificar la cantidad de alternativas.



Adicionalmente, se detectaron tres limitaciones importantes de esta investigación con relación a la función de preferencia utilizada, la asignación de pesos de importancia en los criterios y la integridad de criterios considerados. En el proceso de estimación de los grados de preferencia se utilizó la función Tipo I que se caracteriza por sus valores en los umbrales de indiferencia y de preferencia que son igual a cero; sin embargo, existen al menos otras cinco funciones (Brans y De Smet, 2016) que se pueden utilizar y enriquecen significativamente la incorporación de las preferencias de los tomadores de decisiones. Por otro lado, los pesos de los criterios se definieron utilizando uno de los métodos más simples: la asignación de puntos.

Este procedimiento puede mejorarse mediante la utilización de algún otro método; por ejemplo, el proceso de análisis jerárquico que goza de amplia aceptación (Zardari *et al.*, 2015). Finalmente, la lista de criterios puede ser mejorada al incluir otros importantes como la presencia/ausencia de años húmedos/secos, ya que se ha identificado que los factores humanos tienen mayor influencia en los años secos, mientras que los factores ambientales son de mayor importancia en los años húmedos (Román-Cuesta *et al.*, 2003). Dado lo anterior, se sugiere el uso de alguna de las funciones de preferencia distinta a la del Tipo I, y la utilización de otros métodos de asignación de pesos (objetivo y subjetivo) en futuras aplicaciones PROMETHEE para el análisis de los incendios en distintas regiones. Igualmente, se recomienda profundizar en el análisis de los criterios para considerar otros importantes como el de presencia/ausencia de años húmedos/secos.

Conclusiones

La información generada a partir de la identificación de los criterios, considerados como relevantes en la susceptibilidad de incendios forestales, permitió la aplicación del método PROMETHEE II de manera apropiada. Se obtuvo la priorización de los sitios con base en la susceptibilidad a incendios y, de acuerdo con los resultados, en un mapa se identificaron cinco sitios de alta, veinte de media y cinco de baja susceptibilidad. En el proceso de priorización, los criterios de mayor influencia con respecto al total de peso de importancia fueron: temperatura máxima anual (c1) con 20 %; prácticas de prevención de incendios (c22) con 20 %; carga de combustible total (c9) con 10 %, y distancia a vías de acceso primarias y secundarias (c13) con 10 %. Finalmente, el análisis de sensibilidad demostró que la priorización obtenida con base en la susceptibilidad de los sitios a los incendios es consistente y sólida.



Agradecimientos

La primera autora agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada durante la realización de estudios de maestría y a la Universidad Autónoma Chapingo.

Referencias

- Abarca, Oscar I., y Quiroz, José G. (2005). "Modelado cartográfico de riesgo de incendios en el parque nacional Henri Pittier. Estudio de caso: Vertiente sur, área colindante con la ciudad de Maracay". *Agronomía Tropical*, 55(1), pp. 35-62.
http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2005000100003
- Abedi, Maysam; Torabi, S. Ali; Norouzi, Gholam-Hossain; Hamzeh, Mohammad, y Elyasi Gholam-Reza (2012). "PROMETHEE II: A Knowledge-Driven Method for Copper Exploration". *Computers & Geosciences*, 46, pp. 255-263. DOI: [10.1016/j.cageo.2011.12.012](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.12.012)
- Abrishamchi, Ahmad; Ebrahimian, Ali; Tajrishi, Massoud, y Mariño, Miguel A. (2005). "Case Study: Application of Multicriteria Decision Making to Urban Water Supply". *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(4), pp. 326-335. DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2005\)131:4\(326\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2005)131:4(326))
- Albadvi, Amir; Keramati, Abbas, y 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), pp. 2697-2734. DOI: [10.1080/00207540600767780](https://doi.org/10.1080/00207540600767780)
- Athawale, Vijay y Chakraborty, Shankar (2010). "Facility Layout Selection Using PROMETHEE II Method". *The IUP Journal of Operations Management*, 9(1), pp. 81-98.
https://www.iupindia.in/210/IJOM_PROMETHEE_II_Method_81.html
- Ávila-Flores, Diana; Pompa-García, Marín; Antonio-Nemiga, Xanat; Rodríguez-Trejo, Dante A.; Vargas-Pérez, Eduardo, y Santillán-Pérez, Javier (2010). "Driving Factors for Forest Fire Occurrence in Durango State of Mexico: A Geospatial Perspective". *Chinese Geographical Science*, 20(6), pp. 491-497. DOI: [10.1007/s11769-010-0437-x](https://doi.org/10.1007/s11769-010-0437-x)



- Bowman, David; Balch, Jennifer; Artaxo, Paulo; Bond, William J.; Cochrane, Mark A.; D'Antonio, Carla M.; DeFries, Ruth; Johnston, Fay H.; Keeley, Jon E.; Krawchuk, Meg A.; Kull, Christian A.; Mack, Michelle; Moritz, Max A.; Pyne, Stephen; Roos, Christopher I.; Scott, Andrew C.; Sodhi, Navjot S., y Swetnam, Thomas W. (2011). The Human Dimension of Fire Regimes on Earth. *Journal of Biogeography*, 38(12), pp. 2223-2236. DOI: [10.1111/j.1365-2699.2011.02595.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2011.02595.x)
- Brankovic, Jelena; Markovic, Milica, y Nikolic, Djordje (2018). “Comparative Study of Hydraulic Structures Alternatives Using Promethee II Complete Ranking Method”. *Water Resource Management*, 32, pp. 3457-3471. DOI: [10.1007/s11269-018-2001-x](https://doi.org/10.1007/s11269-018-2001-x)
- Brans, Jean-Pierre, y Vincke, Philippe (1985). Note—A Preference Ranking Organization Method: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making). *Management Science*, 31(6), pp. 647-656. DOI: [10.1287/mnsc.31.6.647](https://doi.org/10.1287/mnsc.31.6.647)
- Brans, Jean-Pierre y De Smet, Yves (2016). “PROMETHEE Methods”. In *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Nueva York, EUA: Springer, 195 pp. DOI: [10.1007/978-1-4939-3094-4_6](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_6)
- Brown, James; Oberheu, Rick, y Johnston, Cameron (1982). “Handbook for Inventorying Surface Fuels and Biomass in the Interior West” (vol. 129). US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. https://www.fs.fed.us/rm/pubs_int/int_gtr129.pdf
- Carmena, Rachel; Parry, Luck; Blackburn, Alan; Vermeylen, Saskia, y Barlow, Jos (2011). Understanding Human-Fire Interactions in Tropical Forest Regions: A Case for Interdisciplinary Research across the Natural and Social Sciences. *Ecology and Society*, 16(1), 53. DOI: [10.5751/ES-03950-160153](https://doi.org/10.5751/ES-03950-160153)
- Carrillo-García, Rosa; Rodríguez-Trejo, Dante; Tchikoué, Hubert; Monterroso-Rivas, Alejandro, y Santillán-Pérez, Javier (2012). “Análisis espacial de peligro de incendios forestales en Puebla, México”. *Interciencia*, 37(9), pp. 678-683. <https://www.interciencia.net/wp-content/uploads/2018/01/678-RODRIGUEZ-6.pdf>
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal) (2019) “Incendios forestales: Serie histórica de datos”. Comisión Nacional Forestal. <https://datos.gob.mx/busca/organization/conafor>



- Cruz Espíndola, Miguel; Rodríguez Trejo, Dante; Villanueva Morales, Antonio, y Santillán Pérez, Javier (2017). “Factores sociales de uso del suelo y vegetación asociados a los incendios forestales en Hidalgo”. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(41), pp. 139-163. <http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/29/67>
- Díaz, Ignacio y González, Mauro (2016). “Análisis espacio-temporal de incendios forestales en la región del Maule, Chile”. *Bosque (Valdivia)*, 37(1), pp. 147-158. doi: [10.4067/S0717-92002016000100014](https://doi.org/10.4067/S0717-92002016000100014)
- Fadlina, Fadlina; Tomoria-Sianturi, Lince; Karim, Abdul; Mesran, Aan, y Utama-Siahaan, Andysah (2017). “Best Student Selection Using Extended PROMETHEE II Method”. *International Journal of Recent Trends in Engineering and Research*, 3(8), pp. 21-29. DOI: [10.23883/IJRTER.2017.3382.SK4CV](https://doi.org/10.23883/IJRTER.2017.3382.SK4CV)
- FAO-ISRIC-SICS (1998). *World Reference Base for Soils Resources*. Roma: FAO.
- Flores Garnica, José Germán; Benavides Solorio, Juan de Dios; Macías Muro, Alejandra; Vega Montes de Oca, Diana Gabriela, y Flores Rodríguez, Ana Graciela (2016). “Metodología para la caracterización de condiciones propicias para incendios forestales en campo”. Folleto INIFAP-CIRPAC. Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco. <https://snigf.cnf.gob.mx/wp-content/uploads/Incendios/Insumos%20Manejo%20Fuego/Areas%20prioritarias/Caracterizacion%20Condiciones%20para%20incendios.pdf>
- García, Enriqueta (1973). Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen. 2ª Edición. México: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ghorbanzadeh, Omid; Blaschke, Thomas; Gholamnia, Khalil, y Aryal, Jagannath (2019). “Forest Fire Susceptibility and Risk Mapping Using Social/Infrastructural Vulnerability and Environmental Variables”. *Fire*, 2(3), 50. doi: [10.3390/fire2030050](https://doi.org/10.3390/fire2030050)
- Gómez-Nieto, Israel; Martín-Isabel, María del Pilar, y Salas-Rey, Francisco Javier (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, pp. 281-304. <https://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/401/341>



- Gómez-Pazo, Alejandro y Salas, Javier (2017). “Modelado del peligro de ignición de incendios forestales en Galicia”. *Revista Geográfica del Sur*, 7(10), pp. 1-14. <http://www.revgeosur.udec.cl/wp-content/uploads/2017/05/01-Gomez-Pazo.pdf>
- Gutiérrez Martínez, Gabriela; Orozco Hernández, María Estela; Ordóñez Díaz, José Antonio, y Camacho Sanabria, José Manuel (2015). “Régimen y distribución de los incendios forestales en el Estado de México (2000 a 2011)”. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(29), pp. 92-107. DOI: [10.29298/rmcf.v6i29.219](https://doi.org/10.29298/rmcf.v6i29.219)
- Hardy, Colin (2005). “Wildland Fire Hazard and Risk: Problems, Definitions, and Context”. *Forest Ecology and Management*, 211, pp. 73-82. DOI: [10.1016/j.foreco.2005.01.029](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.01.029)
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2008). “Conjunto de datos vectoriales escala 1: 1 000 000. Unidades climáticas”. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267568>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2014). Carta topográfica. E14B31a [Electronico]. 1:20 000. México.
- IPCC (International Panel on Climate Change) (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press, 976 pp.
- Ishizaka, Alessio y Nemery, Philippe (2013). “A Multi-Criteria Group Decision Framework for Partner Grouping when Sharing Facilities”. *Group Decision and Negotiation*, 22(4), pp. 773-799. doi: [10.1007/s10726-012-9292-8](https://doi.org/10.1007/s10726-012-9292-8)
- Kumari, Binita y Pandey, Arvind (2020). “Geo-Informatics Based Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) through Analytic Hierarchy Process (AHP) for Forest Fire Risk Mapping in Palamau Tiger Reserve, Jharkhand State, India”. *Journal of Earth System Science*, 129(1), pp. 1-16. DOI: [10.1007/s12040-020-01461-6](https://doi.org/10.1007/s12040-020-01461-6)
- León Villalobos, José María; Anaya Garduño, Manuel; Oropeza Mota, José Luis; Ojeda Trejo, Enrique; Rodríguez-Trejo, Dante Arturo, y García Rodríguez, Jorge Luis (2014). “Aptitud territorial para establecer sistemas de captación del agua de lluvia para combatir incendios forestales”. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(21), pp. 42-56. DOI: [10.29298/rmcf.v5i21.357](https://doi.org/10.29298/rmcf.v5i21.357)



- Macedo, Antonia y Villegas, Isidro (2015). “Dinámica de la cobertura vegetal mediante sensores remotos y su relación con tres asociaciones de suelos forestales” en *Memorias mesa 1ª. 7mo Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas*. Estado de México, Universidad Autónoma Chapingo, pp. 64-75.
- Macharis, Cathy; Springael, Johan, De Brucker, Klaas, y Vebeke, Alain (2004). “PROMETHEE and AHP: The Design of Operational Synergies in Multicriteria Analysis. Strengthening PROMETHEE with Ideas of AHP”. *European Journal of Operational Research*, 153, pp. 307-317. doi: [10.1016/S0377-2217\(03\)00153-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00153-X)
- Moritz, Max; Batllori, Enric; Bradstock, Ross; Gill, Malcolm; Handmer, John; Hessburg, Paul; Leonard, Justin; McCaffrey, Sarah; Odion, Dennis; Schoennagel, Tania, y Syphard, Alexandra (2014). “Learning to Coexist with Wildfire”. *Nature*, 515, pp. 58-66. DOI: [10.1038/nature13946](https://doi.org/10.1038/nature13946)
- Muñoz, Belén; Romana, Manuel G., y Ordóñez, Javier (2016). Sensitivity Analysis of Multicriteria Decision Making Methodology Developed for Selection of Typologies of Earth-Retaining Walls in an Urban Highway. *Transportation Research Procedia*, 18, pp. 135-139. doi: [10.1016/j.trpro.2016.12.019](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.12.019)
- Muñoz Robles, Carlos; Treviño Garza, Eduardo; Verástegui Chávez, José; Jiménez Pérez, Javier, y Aguirre Calderón, Oscar (2005). “Desarrollo de un modelo espacial para la evaluación del peligro de incendios forestales en la sierra madre oriental de México”. *Investigaciones Geográficas*, 56, pp. 101-117. DOI: [10.14350/rig.30099](https://doi.org/10.14350/rig.30099)
- Muñoz-Robles, Carlos y Santana-Arias, Rogelio (2018). “Puntos de calor en la Sierra Madre Oriental de San Luis Potosí: patrones espaciales y factores asociados”. *Madera y Bosques*, 24(1). DOI: [10.21829/myb.2018.2411565](https://doi.org/10.21829/myb.2018.2411565)
- OECD (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos) (2008). “Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide”. OECD Publishing. <https://www.oecd.org/sdd/42495745.pdf>
- Pausas, Javier (2020). *Incendios forestales*. España: Los libros de la Catarata, 199 pp.



- Pérez-Verdín, Gustavo; Márquez-Linares, Marco, Cortés-Ortiz, Armando, y Salmerón-Macías, Maricela (2013). “Análisis espacio- temporal de la ocurrencia de incendios forestales en Durango, México”. *Madera y Bosques*, 19(2), pp. 37-58. DOI: [10.21829/myb.2013.192339](https://doi.org/10.21829/myb.2013.192339)
- Pompa, Marín y 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), pp. 63-68. doi: [10.4067/S0717-92002012000100007](https://doi.org/10.4067/S0717-92002012000100007)
- Pyne, Stephen (2019). *Fire. A brief history*. Seattle, EUA: University of Washington Press, 216 pp.
- Rentería, Juan (2004). “Desarrollo de modelos para control de combustibles en el manejo de ecosistemas forestales en Durango” (Tesis de Doctorado). México: Universidad Autónoma de Nuevo León, 125 pp.
- Rodríguez Trejo, Dante; Ramírez Maldonado, Hugo; Tchikoué, Hubert, y Pérez Santillán, Javier (2008). “Factores que inciden en la siniestralidad de los incendios forestales”. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 33(104), pp. 37-58.
<http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/736/1898>
- Román-Cuesta, Rosa María; Gracia, Marc, y Retana, Javier (2003). Environmental and Human Factors Influencing Fire Trends in ENSO and non-ENSO Years in Tropical Mexico. *Ecological Applications*, 13(4), pp. 1177-1192. doi: [10.1890/1051-0761\(2003\)13\[1177:EAHFIF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2003)13[1177:EAHFIF]2.0.CO;2)
- Sari, Fatih (2021). “Forest Fire Susceptibility Mapping Via Multi-Criteria Decision Analysis Techniques for Mugla, Turkey: A Comparative Analysis of VIKOR and TOPSIS”. *Forest Ecology and Management*, 480, 118644. DOI: [10.1016/j.foreco.2020.118644](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118644)
- Schreuder, Hans; Ernst, Richard, y Ramírez, Hugo (2006). *Técnicas estadísticas para evaluación y monitoreo de recursos naturales*. México: Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales, 151 pp.
- Scott, Andrew; Bowman, David; Bond, William; Pyne, Stephen, y Alexander, Martin (2014). *Fire on Earth. An Introduction*. Chichester: Wiley Blackwell, 413 pp.



- Sennaroglu, Bahar, y Celebi, Gulsay (2018). "A Military Airport Location Selection by AHP Integrated PROMETHEE and VIKOR Methods". *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 59, pp. 160-173. DOI: [10.1016/j.trd.2017.12.022](https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.12.022)
- Torres-Rojo, Juan M. (2020). "Index for the Estimation of the Occurrence of Forest Fires in Large Areas". *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 26(3), pp. 433-449. doi: [10.5154/r.rchscfa.2019.11.082](https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2019.11.082)
- Tuček, Jan y Majlingová, Andrea (2009). "Forest Fire Vulnerability Analysis". En Katarína Střelcová; Csaba Mátyás; Axel Kleidon; Milan Lapin; František Matejka; Miroslav Blaženec; Jaroslav Škvarenina y Ján Holécý (eds.), *Bioclimatology and Natural Hazards*. Dordrecht: Springer, pp. 219-230. doi: [10.1007/978-1-4020-8876-6_19](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8876-6_19)
- Vega-Nieva, Daniel; Nava-Miranda, María; Calleros-Flores, Erick; López-Serrano, Pablito; Briseño-Reyes, Jaime; Medina-Flores, Favian; López-Sánchez, Carlos; Corral-Rivas, José; González-Cabán, Armando; Alvarado-Celestino, Ernesto; Cruz, Isabel; Cuahtle, Martín; Ressler, Reiner; Setzer, Albert; Morelli, Fabiano; Pérez-Salicrup, Diego; Jardel-Pelaez, Enrique; Cortes-Montaña, Citlali; Vega, José, y Jiménez, Enrique (2019). "Desarrollo de un sistema nacional de peligro de incendios forestales para México". En Armando González-Cabán y José J. Sánchez (coords.), *Memorias del quinto simposio internacional sobre políticas, planificación y economía de los incendios forestales: servicios ambientales e incendios forestales*. Albany, CA, EUA: Departamento de Agricultura de EUA, Servicio Forestal, Estación de Investigación del Pacífico Suroeste, pp. 42-52.
- Vetschera, Rudolf y Teixeira, Adiel (2012). "A PROMETHEE-Based Approach to Portfolio Selection Problems". *Computers and Operations Research*, 39(5), pp. 1010-1020. DOI: [10.1016/j.cor.2011.06.019](https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.06.019)
- Veza, Ivica; Celar, Stipo, y Peronja, Iván (2015). "Competences Based Comparison and Ranking of Industrial Enterprises Using PROMETHEE Method". *Procedia Engineering*, 100, pp. 445-449. DOI: [10.1016/j.proeng.2015.01.389](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.389)
- WMO (World Meteorological Organization) (2020). *CLICOM*. Mexico Climatological Station Network Data. Ginebra, Suiza.
- WWF (World Wildlife Foundation) y BCG (Boston Consulting Group) (2020). "Fires, Forests and the Future: A Crisis Raging out of Control?".



https://wwfeu.awsassets.panda.org/downloads/wwf_fires_forests_and_the_future_report.pdf

Yazdani, Morteza; Zavadskas, Edmundas; Ignatius, Joshua, y Abad, Manuel (2016). Sensitivity Analysis in MADM Methods: Application of Material Selection. *Engineering Economics*, 27(4), pp. 382-391. doi: [10.5755/j01.ee.27.4.14005](https://doi.org/10.5755/j01.ee.27.4.14005)

Zardari, Noorul; Ahmed, Kamal; Shirazi, Sharif, y Yusop, Zulkifli (2015). *Weighting Methods and their Effects on Multi-Criteria Decision Making Model Outcomes in Water Resources Management*. Springer, 166 pp.

Editor asociado: Juan Carlos Pérez Jiménez
Recibido: 15 julio 2021
Aceptado: 13 diciembre 2021