

Desarrollo de un modelo espacial para la evaluación del peligro de incendios forestales en la Sierra Madre Oriental de México

Carlos Alfonso Muñoz Robles*
Eduardo Javier Treviño Garza**
José Verástegui Chávez***
Javier Jiménez Pérez**
Oscar Alberto Aguirre Calderón**

Recibido: 2 de diciembre de 2003
Aceptado en versión final: 14 de abril de 2005

Resumen. El propósito de este estudio fue crear un modelo para evaluar el peligro de incendios forestales en una porción de bosque de clima templado en el estado de Nuevo León. Se empleó el método de análisis espacial multicriterio para integrar y evaluar en un sistema de información geográfica las variables que tienen influencia alta en el peligro de incendios forestales. La estructura del índice de peligro de incendios forestales incluyó tres componentes. El componente de combustibles forestales, que fue generado a partir de la evaluación de la carga de combustibles forestales muertos; el componente meteorológico se estructuró con la integración de la temperatura media máxima mensual y la precipitación total mensual. Por último, el componente de causa se derivó mediante la evaluación de elementos socioeconómicos representados por rasgos geográficos. Los tres componentes fueron integrados en una regla de decisión y se crearon mapas mensuales que mostraron la localización de las áreas vulnerables a incendios forestales.

Palabras clave: Peligro de incendios, combustibles forestales, meteorológico, evaluación multicriterio, México.

A spatial model for assessing forest fire danger in the Sierra Madre Oriental Mountains, Mexico

Abstract. The aim of this study was to develop a model for assessing forest fire danger in a temperate forest located in the state of Nuevo León, Mexico. A spatial multicriteria analysis was conducted in order to integrate and evaluate in a Geographic Information System those variables that influence fire danger levels. The structure of the fire danger index included three components. The forest fuels component, generated through the inventory of dead surface fuels loads; the weather index, that was built through the analysis of maximum monthly mean temperature and total monthly precipitation. The last component of the fire danger index was calculated by assessing social and economic features. The three components were integrated into a decision rule, and monthly maps were created to show the location of forest fire danger vulnerability.

Key words: Fire danger, forest fuels, multicriteria evaluation, Mexico.

*Instituto de Ecología, A.C. Centro de Investigación sobre Sequía, Km. 33.3 Carretera Chihuahua-Ojinaga, Cd. Aldama, Chihuahua. E-mail: carlosm@sequia.edu.mx, cmunoz.robles@gmail.com

**Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León, Carretera Nacional, Km. 145, Linares, Nuevo León. E-mail: ejtrev01@prodigy.net.mx

***Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Km. 31 Carretera Monterrey-China, General Terán, N. L.

INTRODUCCIÓN

Debido a las condiciones climáticas de México, existen áreas vulnerables a incendios forestales, donde un gran número impacta significativamente los ecosistemas durante la época seca del año. De acuerdo con estadísticas de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2001), de 1991 a 2000 ocurrieron en México 82 730 incendios forestales que afectaron una superficie de 26 754 km². Por su parte, el estado de Nuevo León registró 619 incendios durante el periodo de 1980 a 1998, que ocasionaron daños a una superficie de 1 032.8 km². Particularmente de 1989 a 1998, el problema se agravó debido a las condiciones meteorológicas que favorecieron la presencia de incendios (SEMARNAT, Delegación Federal en Nuevo León, 1999), y de acuerdo con Treviño *et al.* (2000), en el sur de Nuevo León las comunidades vegetales más afectadas durante la temporada de incendios de 1998 fueron los matorrales desérticos, las áreas con chaparral y bosques de clima templado, que sumaron una superficie de 239.95 km² siniestrados.

Los incendios en México son conceptuados como el factor de perturbación que más daño ha causado a los ecosistemas, y son la resultante de la interacción de diversos elementos de carácter socioeconómico e incluso político y cultural que, influidos por factores topográficos y climáticos, dificultan la minimización de los daños (Sánchez, 1989). Con la finalidad de reducir los daños por el fuego, dirigir las acciones de combate, y contar con una mejor eficiencia en el uso de los recursos humanos y materiales, es preciso contar con estrategias de prevención y control de incendios. El éxito en el diseño y ejecución de planes de manejo forestal que incorporen dichas estrategias, depende en gran medida del conocimiento de un Índice de Peligro de Incendios Forestales (IPIF), capaz de reflejar la posibilidad de que un incendio ocurra considerando factores meteorológicos, combus-

tibles forestales, rasgos topográficos y la influencia de las actividades humanas en el bosque.

A través del tiempo han sido desarrollados diversos modelos para estimar el IPIF considerando principalmente variables meteorológicas y combustibles forestales (Stolyarchuk 1979; Mathur *et al.* 1984; Marcozzi *et al.* 1994; Mandallaz y Ye. 1997; Wybo, *et al.* 1995; Gutiérrez *et al.* 1997; Gouma y Chronopoulou-Sereli 1998; Leathwick y Briggs 2001). Hoy en día existen sistemas en el ámbito mundial para identificar las áreas con peligro de incendios, entre los que destacan el *Canadian Forest Fire Danger Index* (Lee *et al.* 2002); el sistema *Forest Fire Danger Index* desarrollado en Australia (CSIRO *Forestry and Forest Products* 2000) y el *National Fire Danger Rating System*, desarrollado por el Servicio Forestal de Estados Unidos de América (Deeming *et al.*, 1978). Sin embargo, los estudios desarrollados en México han sido esfuerzos aislados que consideran principalmente la carga de combustibles forestales y algunas variables meteorológicas (Magaña, 1985; Zapata, 1991; Santillán, 1993). Destaca el trabajo realizado por Sepúlveda *et al.* (1999), quienes obtuvieron índices de peligro de incendios analizando espacialmente modelos de combustibles y variables meteorológicas en Baja California. A nivel nacional ha sido adoptado el modelo canadiense de peligro de incendios (SEMARNAT, 2001). Sin embargo, la necesidad de conocer con mayor detalle las áreas con peligro de incendios e incorporarlas al manejo forestal, es una prioridad considerada por la mayoría de los poseedores y administradores de los recursos forestales, por lo que en este estudio se propuso un modelo que cumpliera con esta característica.

UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El ejido Corona del Rosal se encuentra en la Sierra Madre Oriental, en el centro-sur del

estado de Nuevo León (Figura 1). Ocupa una superficie de 66.46 km² y se localiza entre los 24° 27' 23" y 24° 32' 51" de latitud norte y entre los 99° 53' 54" y 100° 01' 34" de longitud oeste:

El clima en la zona es seco, de tipo semi-árido, con temperatura media anual entre 12 y 18° C, y la temperatura del mes más cálido mayor de 18° C (García 1973). La topografía es accidentada, con pendientes pronunciadas y un gradiente altitudinal de 1 620 m, que va de los 1 540 a los 3 160 msnm. Estas características favorecen el desarrollo de chaparrales asociados con bosques de clima templado, donde las especies dominantes son *Pinus pseudostrobus* Lindl. y *Pinus cembroides* Zucc. Existen, además, áreas destinadas al uso

agrícola y a la inducción de pastizales. La superficie forestal aprovechable es de 17.22 km², siendo *Pinus pseudostrobus* Lindl. la especie con mayor valor económico (UCDF No. 1, 1996).

METODOLOGÍA

La primera fase del estudio consistió en la selección de las variables a integrar en el modelo espacial y la evaluación de las mismas. Las variables elegidas fueron el complejo de combustibles forestales, la precipitación pluvial, la temperatura máxima y algunos factores de carácter socioeconómico, como áreas de aprovechamiento forestal, vías de acceso y poblaciones.

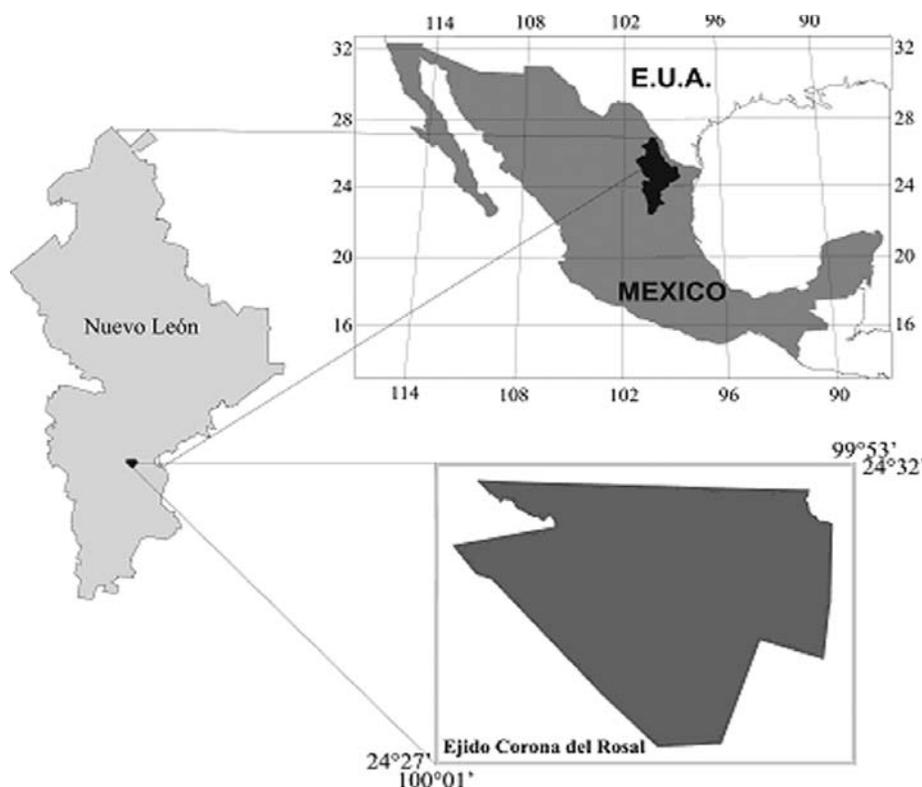


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

Cuantificación de combustibles forestales

Las partículas leñosas pequeñas pierden rápidamente parte de su humedad como consecuencia de sus dimensiones. Esta condición favorece en gran medida la combustión y el inicio de la mayoría de los incendios, por lo que constituyen una variable de gran influencia en el peligro de incendios. Para estimar la cantidad o carga de combustibles, se realizó un inventario con un diseño de muestreo estratificado al azar, donde los tipos de vegetación constituyeron los estratos. La obtención de los datos se realizó con la técnica de intersecciones planares, que ha sido ampliamente difundida y utilizada en diversos tipos de bosques con el fin de caracterizar el complejo de combustibles forestales (Brown, 1974; Brown *et al.* 1982; Van Wagner, 1982). Cada sitio de muestreo consistió en la ubicación de una línea de 20 m de longitud cuya dirección fue definida aleatoriamente. Las partículas leñosas intersectadas por la línea cuya clase diamétrica fuese de 0.1 a 2.5 cm de diámetro se registraron durante el primer metro de la línea, las partículas con clase diamétrica de 2.5 a 7.5 cm se midieron a través de los primeros cuatro metros de longitud de la línea, y, finalmente, las partículas con diámetros mayores a 7.5 cm se midieron en la totalidad de la longitud de la línea.

Para el caso de la cama de combustibles forestales, se registró su profundidad a los 5, 10, 15 y 20 m de longitud de la línea. Además, se colectó la hojarasca contenida en 1 m², compuesto por cuatro cuadrantes de .25 m² distribuidos a lo largo de la línea. Cada cuadrante fue pesado *in situ* y se tomó una muestra de 300 g para su posterior secado en el laboratorio. El peso seco de estas muestras fue relacionado con el peso del material colectado *in situ* y de esta forma se obtuvo la cantidad de este tipo de combustible por unidad de superficie.

Por otra parte, la estimación de la carga de combustibles superficiales muertos se

realizó siguiendo los lineamientos propuestos por Van Wagner (1982), empleando la siguiente ecuación:

$$w_1 = \left(G \frac{0.1234}{L} \right) \sum d^2 * c$$

siendo w_1 el peso del material combustible por unidad de superficie; d el diámetro de la partícula en la intersección, L la longitud de la línea de muestreo, G gravedad específica de la madera, 0.1234 la constante de transformación de volumen a kg/m² y, c un factor de corrección por pendiente:

$$c = \sqrt{1 + \left(\frac{\%pendiente}{100} \right)^2}$$

El análisis de datos permitió clasificar los combustibles en tres categorías: ligeros, pesados y cama de combustibles. La carga de combustibles por tipo para cada estrato fue asignada a los polígonos de vegetación, dando lugar a la cartografía del complejo de combustibles forestales.

Generación de modelos digitales del terreno

Las variables topográficas seleccionadas fueron la altitud sobre el nivel del mar y la orientación de la pendiente. Ambos rasgos se consideraron como expresiones de la variación de la temperatura y la humedad en el terreno, y para su representación se empleó un modelo digital de elevaciones con una resolución espacial de 30 m generado a partir de curvas de nivel.

Análisis de variables meteorológicas

Se estudiaron la temperatura media máxima mensual y precipitación total mensual, debido a su influencia en el contenido de humedad de los combustibles, factor que regula la ocurrencia de incendios forestales. La Comisión Nacional del Agua (CNA) proporcionó datos para 18 estaciones climatológicas con una serie de datos comprendida de 1978 a 1998. La

ausencia de registros de datos para ciertos periodos de tiempo fue resuelta con la estimación de los valores en función de un análisis de correlación, de acuerdo con lo recomendado por Villalpando y García (1993). Se identificó la estación más cercana a cada estación con registros faltantes y se realizó el análisis de correlación de las series de datos –la serie completa y la serie incompleta– y en el caso de que el valor de correlación fuese mayor a $r = 0.8$, se estimó el valor faltante con el modelo generado por este análisis. Para los casos en que el valor de correlación no fue satisfactorio, se utilizó un promedio aritmético resultante de las estaciones adyacentes a la estación bajo estudio siguiendo los lineamientos descritos por Wanielista *et al.* (1997).

Para conocer la distribución espacial de las variables meteorológicas, se recurrió al método global de interpolación por funciones de regresión, basado en el análisis de una serie de rasgos ligados al territorio, esto es, considerando la relación existente entre la altitud, latitud y longitud de las estaciones meteorológicas y la temperatura y la precipitación pluvial. El objetivo de este análisis es obtener modelos numéricos que permitan estimar el valor de estas variables climáticas a partir de variables independientes de fácil adquisición (Ninyerola *et al.*, 2000; Sánchez *et al.*, 1999 y Salas, 1995). Por último, se elaboró la cartografía mediante la aplicación de los modelos de regresión y técnicas básicas de análisis espacial para obtener 24 mapas, 12 de temperatura media máxima mensual y 12 de precipitación total promedio mensual.

Evaluación de variables socioeconómicas

Debido a la dificultad de representar espacialmente los agentes causales de incendios, y en virtud de la importancia de su integración en el modelo de peligro, se realizó el análisis de los rasgos geográficos asociados con actividades humanas. Chuvieco *et al.* (2000),

García *et al.* (1999) y Almeida (1994), señalan que el desarrollo de un modelo de predicción de incendios siempre presenta una gran dificultad debido a la incertidumbre asociada al comportamiento humano en relación con el fuego. Los autores citados estimaron indirectamente el riesgo humano en España, Canadá y Portugal, respectivamente, empleando la distancia a carreteras, a ciudades, el tipo de propiedad y el valor comercial de la masa forestal. En el caso de este estudio, los rasgos evaluados fueron las áreas sometidas al manejo forestal, la distancia a las vías de acceso y la distancia a los poblados.

Integración de los criterios

La integración de las variables para calcular el Índice de Peligro de Incendios Forestales (IPIF) se realizó en términos de una Evaluación Multicriterio (EMC). A través de la selección y análisis de los criterios indicados en la Figura 3, se obtuvo una regla de decisión que mostró las alternativas de solución al objetivo (Eastman, 1999), en este caso la localización de áreas susceptibles a incendios forestales. En virtud de que cada criterio tiene unidades dimensionales distintas, fue necesario estandarizar cada variable a un rango numérico común –escala *byte*–, lo que permitió su posterior combinación espacial a través de un promedio ponderado (Malczewski, 1999). La escala *byte* consta de 256 valores, donde el 0 representa el menor valor de la alternativa y el 255 el mayor valor. Lo anterior indica que, conforme aumenta el valor *byte*, el peligro de incendios se incrementa. La estandarización de cada criterio fue llevada a cabo con el comando *FUZZY* incluido en el programa Idrisi32^R.

Para el complejo de combustibles forestales, se asignó el valor de 255 a la mayor carga de combustibles por unidad de superficie, y el 0 a la ausencia de combustibles forestales. La base para definir los valores *byte* mínimos y máximos de la temperatura y precipita-

ción se fundamentó en el análisis histórico de la época seca en la zona. De esta manera, a los píxeles que presentaban la temperatura histórica más baja se les asignó el valor de 0, mientras que aquellos píxeles que contenían la temperatura máxima se les asignó el valor de 255.

El análisis de la precipitación resultó en un procedimiento de estandarización inverso, ya que a los píxeles cuyo valor fuese el mínimo histórico mensual, se les asignó el valor de 255, mientras que los píxeles con la mayor precipitación resultaron en un valor menor al final del análisis. La Figura 2 muestra gráficamente la época seca, que incluye el periodo de enero a abril y el mes de noviembre. Los valores mostrados corresponden al promedio histórico de temperatura y precipitación que sirvieron para la estandarización de valores.

Los mapas estandarizados de la distancia a las vías de acceso y la cercanía a poblados fueron calculados empleando una relación lineal inversa en la que, cuanto mayor cercanía exista a la vía de comunicación o al poblado, el nivel del peligro aumentará. Se estable-

cieron como distancias de mayor riesgo, 50 m para el caso de las brechas de extracción de madera, 20 para las veredas y para la carretera 50. La distancia definida en relación con los poblados fue de 500 m, determinados en función de un radio de distancia en donde los pobladores suelen desarrollar actividades agropecuarias.

Asignación de valores de importancia a los criterios

En el contexto de la EMC, se considera que los criterios a evaluar no poseen el mismo grado de influencia en la solución del problema espacial planteado, sino que existe un esquema jerárquico en donde cada criterio aporta valores de importancia en distinta proporción. Para el modelo propuesto se obtuvieron los componentes de combustibles forestales (CCF), meteorológico (CM) y el de causa (CC), que dieron lugar al IPIF. En la Figura 3 puede observarse la estructura del modelo de peligro de incendios forestales, así como las variables que se evaluaron para

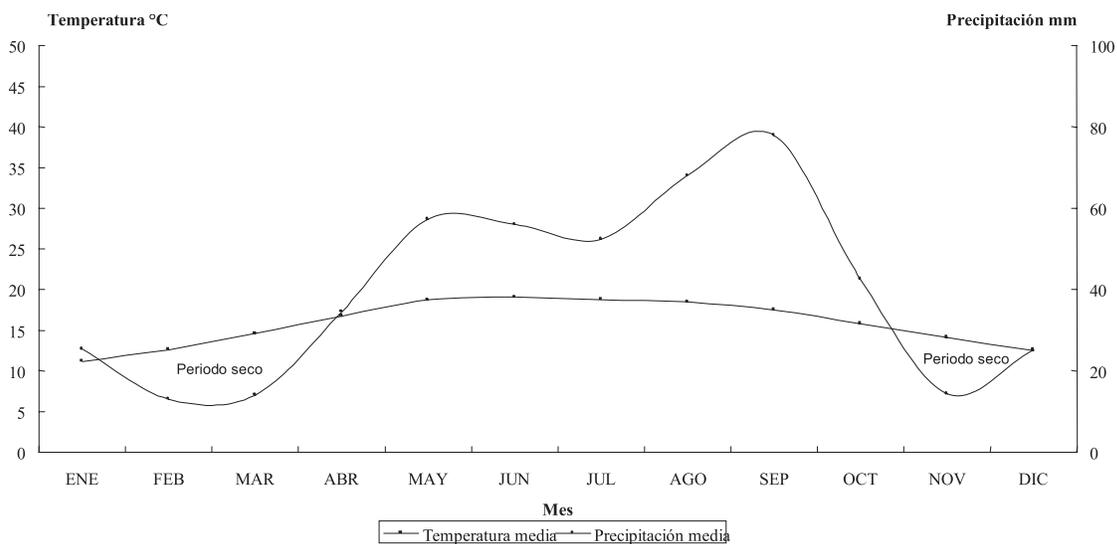


Figura 2. Definición de periodos secos en el ejido Corona del Rosal.

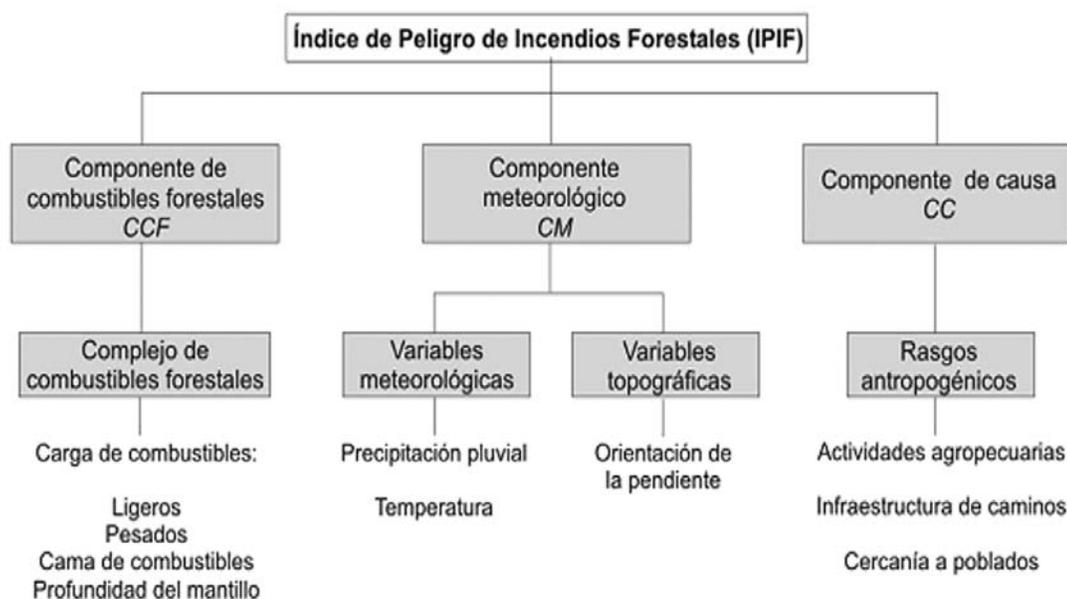


Figura 3. Modelo conceptual propuesto para la evaluación del peligro de incendios forestales.

(Malczewski, 1999) con el comando *WEIGHT* incluido en el módulo *Decision support* del programa Idrisi32^R. En la Figura 4 puede observarse la estructura de la matriz de comparación de criterios, calificados con base en una escala de puntuaciones (Figura 5). La matriz de comparación consta de dos partes, divididas por la diagonal que se establece al comparar cada criterio con sí mismo, que resulta en un valor de 1. El ejemplo ilustrado en la Figura 4, muestra que el criterio 2 tiene menor importancia comparado con los criterios 1 y 3, sin embargo, este último es de mayor importancia que el criterio 2. El producto del análisis de las matrices de comparación son los valores de importancia los criterios, obtenidos mediante el procedimiento matemático descrito por Malczewski (1999) e indican el grado de contribución de cada criterio dentro de cada componente. Se construyó una matriz de comparación para cada componente, y, finalmente, se generó una

última matriz que incluyó la comparación de los tres componentes, obteniendo así los valores de importancia que constituyeron el modelo de peligro de incendios.

La importancia relativa puede resultar en un valor inadecuado si se considera que el evaluador pudo haber efectuado comparaciones incongruentes; sin embargo, el índice de consistencia refleja la solidez de las comparaciones realizadas y muestra la probabilidad de que los valores de importancia fueron generados aleatoriamente. Se considera que un valor menor de 0.10 manifiesta un nivel de consistencia acertado en las comparaciones (Eastman, 1999; Malczewski, 1999).

La integración de los criterios en cada componente y en el modelo final, se realizó mediante una Combinación Lineal Ponderada, cuya expresión es:

$$r_i = \sum_k w_k r_{ik}$$

	critero 1	critero 2	critero 3
critero 1	1	3	2
critero 2	1/3	1	1/2
critero 3	1/2	2	1

Figura 4. Matriz de comparación de criterios.

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
extremo	muy fuerte	fuerte	moderado	igual	moderado	fuerte	muy fuerte	extremo
menor importancia				mayor importancia				

Figura 5. Escala de puntuaciones para calificar criterios.

donde r_i es el vector de prioridades asociado con el $késimo$ elemento de la estructura jerárquica de los criterios, $\sum_k w = 1$; y r_{ik} es el vector de prioridades derivado de la comparación de alternativas de cada criterio.

Esta regla de decisión incorpora un método aditivo diseñado para resolver el objetivo planteado –la localización de áreas susceptibles a incendios– a través del producto de los valores de importancia de cada criterio (w) y sus alternativas estandarizadas (r).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las cargas más elevadas de combustibles leñosos se encontraron en el bosque de *Pinus pseudostrobus* Lindl., seguido por el bosque de *Pinus pseudostrobus* Lindl., asociado con *Quercus spp.*, el bosque de *Pinus pseudostrobus*

Lindl. (Figura 6). Estas cantidades de combustibles son resultado de los residuos de corta en sitios donde se aprovecha la especie *Pinus pseudostrobus* Lindl., mientras que en bosques de *Pinus cembroides* Zucc., la cantidad de desperdicios es menor debido a la baja intensidad de corta originada por la escasa importancia económica de la especie.

En este estudio se determinó que la variabilidad de los combustibles está en función de la intensidad de manejo forestal, ya que éste provoca mayor alteración en el arreglo espacial de las partículas leñosas debido a las actividades de corta y extracción de madera. La variabilidad temporal y espacial de los combustibles ha sido reportada en la mayoría de los estudios relacionados con la evaluación del complejo de combustibles forestales (Brown *et al.*, 1982; Alvarado, 1986; Agee y Huff, 1987).

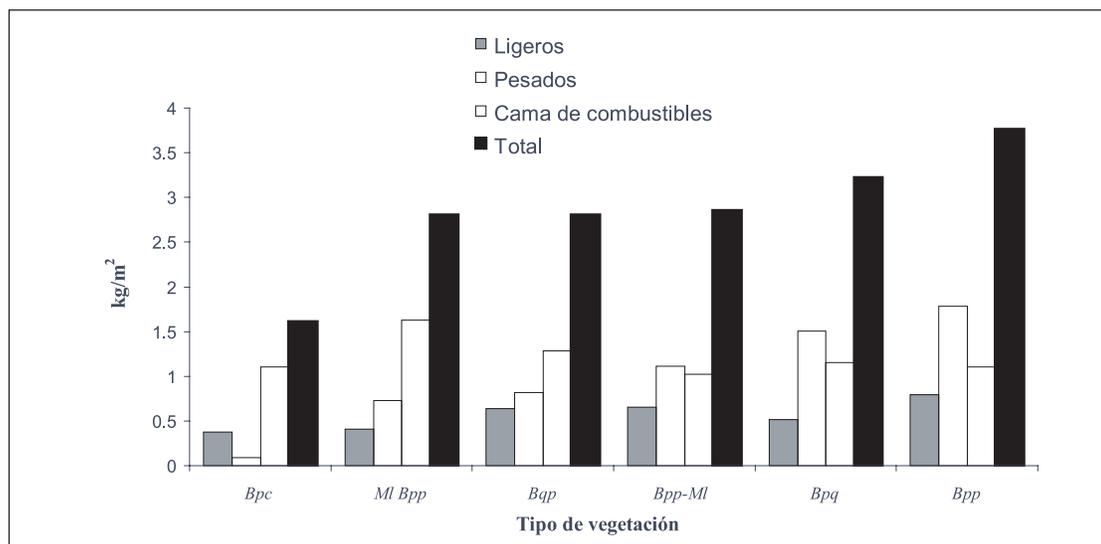


Figura 6. Carga de combustibles forestales muertos según tipo de vegetación.

Bpp = Bosque de *Pinus pseudostrobus* Lindl.; MI-Bpp = Chaparral asociado con Bosque de *Pinus pseudostrobus* Lindl.; Bpp-MI = Bosque de *Pinus pseudostrobus* Lindl. asociado con chaparral; Bpc = Bosque de *Pinus cembroides* Zucc.; Bpq = Bosque de pino-encino; Bqp = Bosque de encino-pino.

generar cada uno de sus componentes.

Los valores relativos de importancia para cada variable se calcularon a través del análisis de una matriz de comparación de criterios

La mayor importancia designada en el CCF, correspondió a la cama de combustibles y a su profundidad. Estos atributos representan las partículas de menores dimensiones, susceptibles de perder humedad rápidamente e iniciar un incendio. La menor importancia en este componente fue atribuida a los combustibles pesados, que si bien contribuyen a que un incendio alcance una gran intensidad, no tienen un efecto significativo en el inicio del fuego.

Para estimar el valor de temperatura media máxima se empleó la forma simple de una función de regresión lineal, utilizando como variable independiente la altitud sobre el nivel del mar. El Cuadro 1 contiene el resumen de los modelos de estimación de

temperatura para cada mes, mientras que en la Figura 7 se muestran los valores estimados y observados de temperatura en la época de incendios, a los que se les ha superpuesto la recta ideal con la finalidad de revisar si las predicciones son acordes a los valores reales. La alta dependencia de la temperatura máxima con la altitud permitió construir modelos con los que se lograron estimaciones comprendidas dentro de un 10% de error respecto al valor promedio mensual. Las estimaciones más confiables se obtuvieron para los meses más cálidos, comprendidos en el periodo de abril a agosto, donde los valores de R fluctuaron entre 0.79 y 0.83.

Considerando que la precipitación es uno de los elementos del clima con gran variabilidad temporal y espacial, se estableció que los modelos de estimación de la precipitación en la estación seca resultaron aceptables, de acuerdo con los parámetros de evaluación

Cuadro 1. Resumen del modelo de regresión lineal simple para la estimación

Mes	R	Error estándar de la estimación	p <	a	b
ENERO	.76	1.69	0.0001	30.81832157	-0.005966751
FEBRERO	.77	1.78	0.0001	33.38704831	-0.00638513
MARZO	.79	1.79	0.0000	36.71166067	-0.006895684
ABRIL	.80	1.71	0.0000	38.52252634	-0.00685643
MAYO	.79	1.66	0.0000	39.43160039	-0.006387822
JUNIO	.79	1.64	0.0000	39.37811811	-0.006416703
JULIO	.83	1.47	0.0000	39.11676405	-0.006553821
AGOSTO	.82	1.43	0.0000	38.08471796	-0.006228803
SEPTIEMBRE	.75	1.61	0.0002	35.54162023	-0.005517958
OCTUBRE	.78	1.56	0.0000	35.15084626	-0.005962016
NOVIEMBRE	.77	1.46	0.0001	32.42724124	-0.005262022
DICIEMBRE	.81	1.54	0.0000	32.90166091	-0.006400774

dia mensual, que actúa de forma semejante a una restricción, ya que la cantidad de lluvia está directamente relacionada con periodos de sequía y a su vez éstos con la ocurrencia de incendios. La temperatura media máxima ocupó el segundo nivel de importancia, seguida de la orientación de la pendiente.

En el CC, las áreas de aprovechamiento recibieron la mayor importancia en virtud de que representan zonas de intensa influencia humana. De forma similar, se asignó gran importancia a la distancia a brechas, debido a que son las vías de acceso y transporte de

vehículos con carga de madera en las áreas de corta y a sus costados suelen establecerse los campamentos de los operadores de actividades de corta. La distancia a poblados recibió un menor valor a causa de la baja densidad de población en la zona.

El IPIF fue construido a partir de los valores de importancia dados a cada uno de los componentes. La consistencia de la asignación de estos valores alcanzó niveles aceptables para los tres componentes y se expresó a través del índice de consistencia, simbolizado con (*) a la derecha de cada ecuación.

$$\begin{aligned}
 CCF &= cc(0.3067) + cl(0.2610) + cp(0.0613) + pcc(0.3710) & *0.02 \\
 CM_i &= tmm_i(0.2493) + ptm_i(0.5936) + op(0.1571) & *0.05 \\
 CC &= aa(0.4211) + db(0.3431) + dc(0.05000) + dv(0.0687) + dp(0.1172) & *0.08
 \end{aligned}$$

donde:

CCF componente de combustibles forestales
 CM_i componentes meteorológico para el mes *i*
 CC componente de causa
 cc cama de combustibles
 cl combustibles ligeros
 cp combustibles pesados
 pcc profundidad de la cama de combustibles

tmm_i temperatura media máxima del mes *i*
 ptm_i precipitación del mes *i*
 op orientación de la pendiente
 aa áreas de aprovechamiento forestal
 db distancia a brechas de extracción de madera
 dc distancia a carreteras
 dv distancia a veredas
 dp distancia a poblados

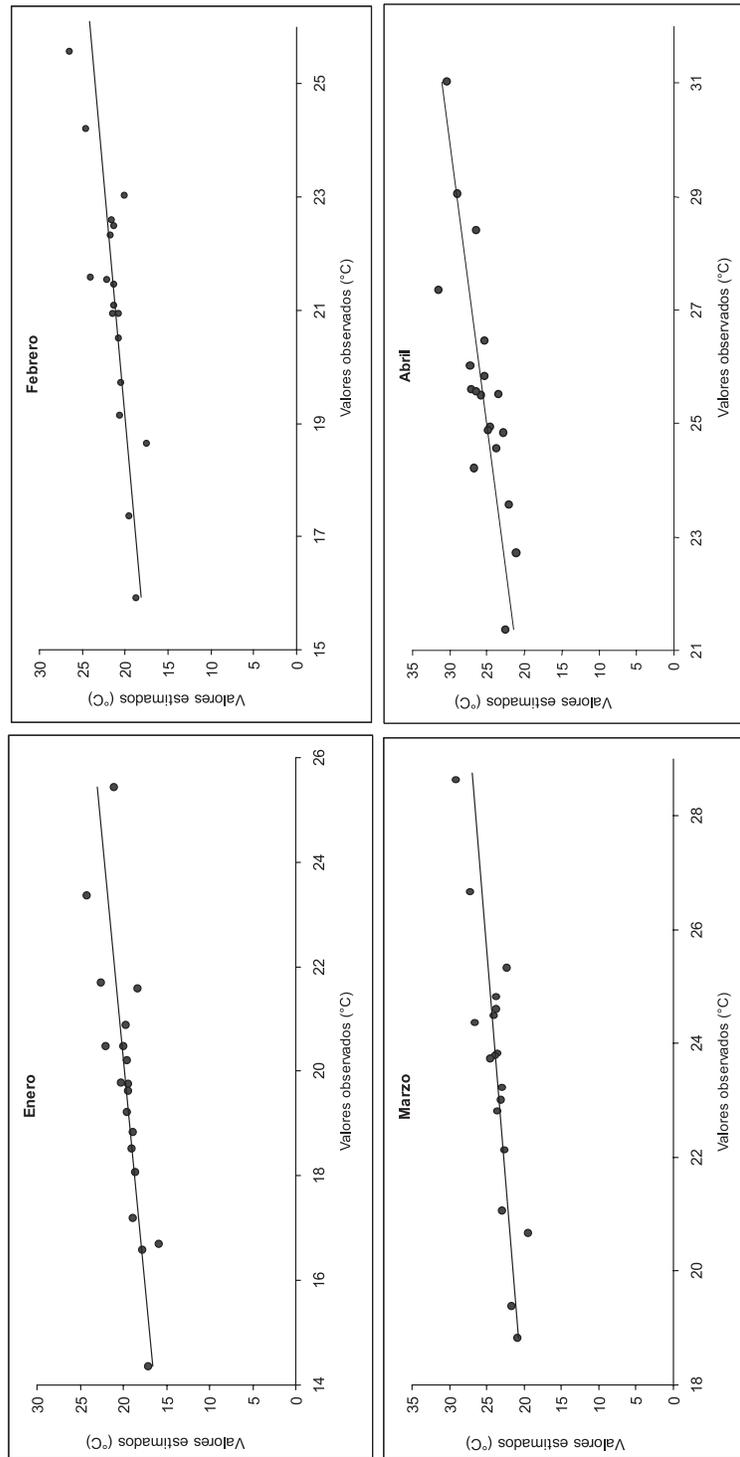


Figura 7. Valores estimados y valores observados de temperatura media máxima mensual.

Cuadro 2. Resumen del modelo de regresión lineal múltiple para la estimación de la precipitación total promedio mensual

Mes	r	Error estándar de la estimación	p <	β_0	β_1 (z)	β_2 (x)	β_3 (y)
ENERO	.78	6.82	0.0041	-557.924161	0.01401229 ..	0.00018163 ·	0.00017899 ..
FEBRERO	.83	2.57	0.0008	-295.324397	0.00572653 ..	0.00014436 ..	0.00008871 ..
MARZO	.85	2.53	0.0004	-238.904628	0.00564483 ..	0.00020524 ..	0.000059845 ..
ABRIL	.75	6.12	0.0072	-651.459969	0.00454139	0.00030582 ..	0.00020555 ..
MAYO	.79	9.56	0.0030	-977.468736	0.01654297 ·	0.00041842 ..	0.00030951 ..
JUNIO	.83	12.18	0.0009	-1389.91131	0.02498031 ..	0.00078981 ..	0.0004019 ..
JULIO	.74	12.18	0.0105	-902.291243	0.02221484 ·	0.00060444 ·	0.00024953 ·
AGOSTO	.78	21.19	0.0033	-2462.65744	0.00439918	0.00135065 ..	0.00073507 ..
SEPTIEMBRE	.86	21.13	0.0002	-2780.65057	-0.00373895	0.00189007 ..	0.0007842 ..
OCTUBRE	.84	11.12	0.0005	-1740.06282	-0.00775499	0.00078857 ..	0.00054853 ..
NOVIEMBRE	.70	4.07	0.0215	-274.543305	0.00595826	0.00008090	0.000090622 ..
DICIEMBRE	.86	4.04	0.0002	-314.347037	0.01671787 ..	0.00023748 ..	0.00007945 ·

* Nivel de significación = 90%.

** Nivel de significación = 95%.

Finalmente, se llevó a cabo de nuevo una sumatoria lineal ponderada para dar lugar al *IPIF*. El índice de consistencia al integrar los tres componentes fue de 0.06:

$$IPIF = CM(0.6144) + CCF(0.2684) + CC(0.1172),$$

siendo *IPIF* el Índice de Peligro de Incendios Forestales; *CM* el componente meteorológico; *CCF* componente de combustibles forestales; *CC* el componente de causa.

En el *IPIF*, las condiciones meteorológicas recibieron el 60% de la importancia, ya que determinan las condiciones de pérdida o ganancia de humedad en los combustibles. La cantidad y tipo de combustibles forestales aportaron cerca del 25% de la importancia, teniendo más influencia en las áreas con intenso manejo forestal. Por último, los factores socioeconómicos recibieron el menor valor de porque la zona no está densamente poblada, no se realizan actividades de recreación, ni existen problemas de litigio de la propiedad.

La mayor superficie de las áreas arboladas

del ejido posee grados de peligro bajos e intermedios; sin embargo, para los meses secos, del 50 al 60% de la superficie tiene un grado de peligro medio, llegándose a encontrar zonas de peligro alto en el 40% de la superficie arbolada. El peligro de incendios alcanza niveles excepcionales en la porción noreste del ejido, donde se conjunta una serie de factores que favorecen la presencia de incendios. Esta zona constituye el área de aprovechamiento forestal más extensa del ejido, se encuentra la mayor carga de combustibles forestales y existe presencia humana constante. Por otra parte, la menor altitud sobre el nivel del mar en esta área ocasiona temperaturas altas y lluvias escasas (Figura 9). El *IPIF* adquirió los valores máximos para los meses de febrero, marzo, abril y noviembre, alcanzando un valor de hasta 242 (Figura 10). Una vez establecida la estación húmeda, el peligro disminuye durante los meses de mayo a octubre, toda vez que las cantidades de precipitación superan los valores promedio esperados, anulando

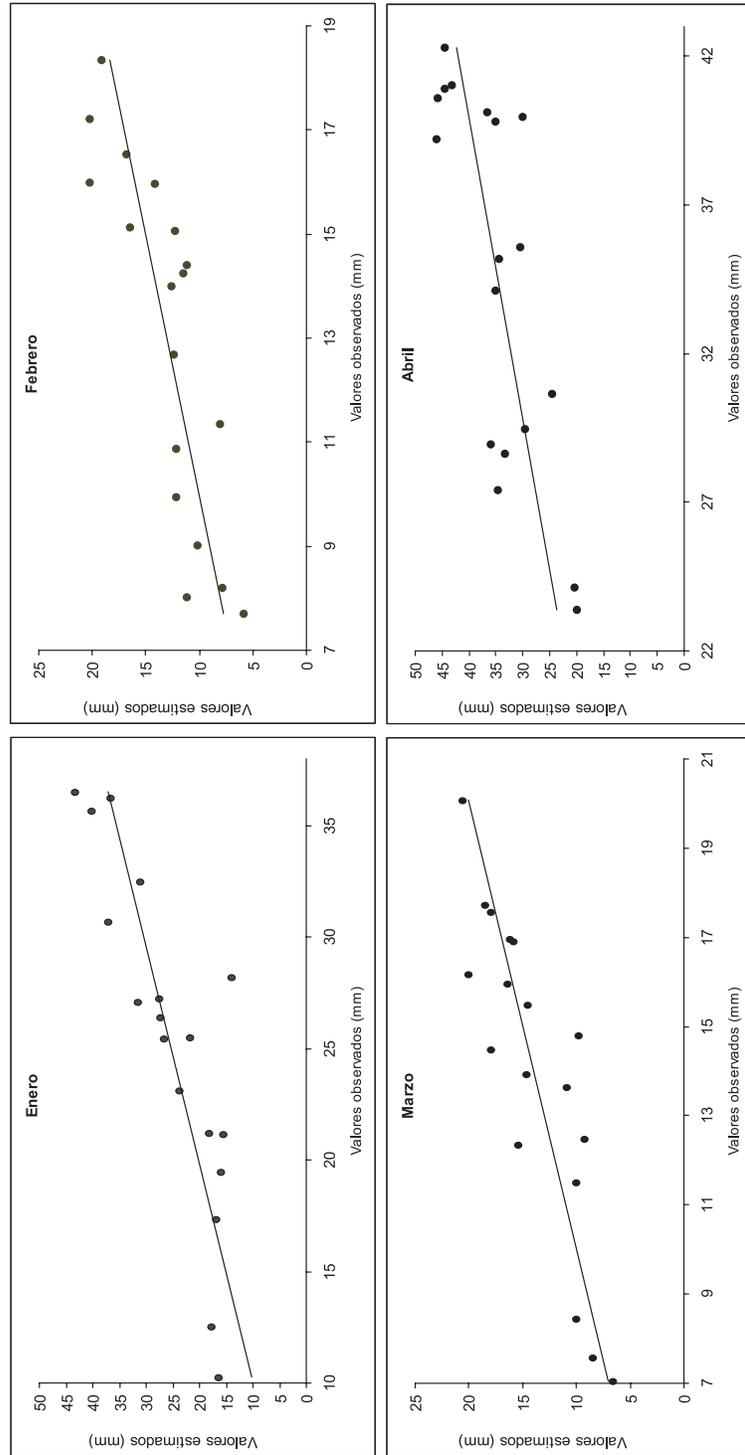


Figura 8. Valores estimados y valores observados de precipitación total mensual.

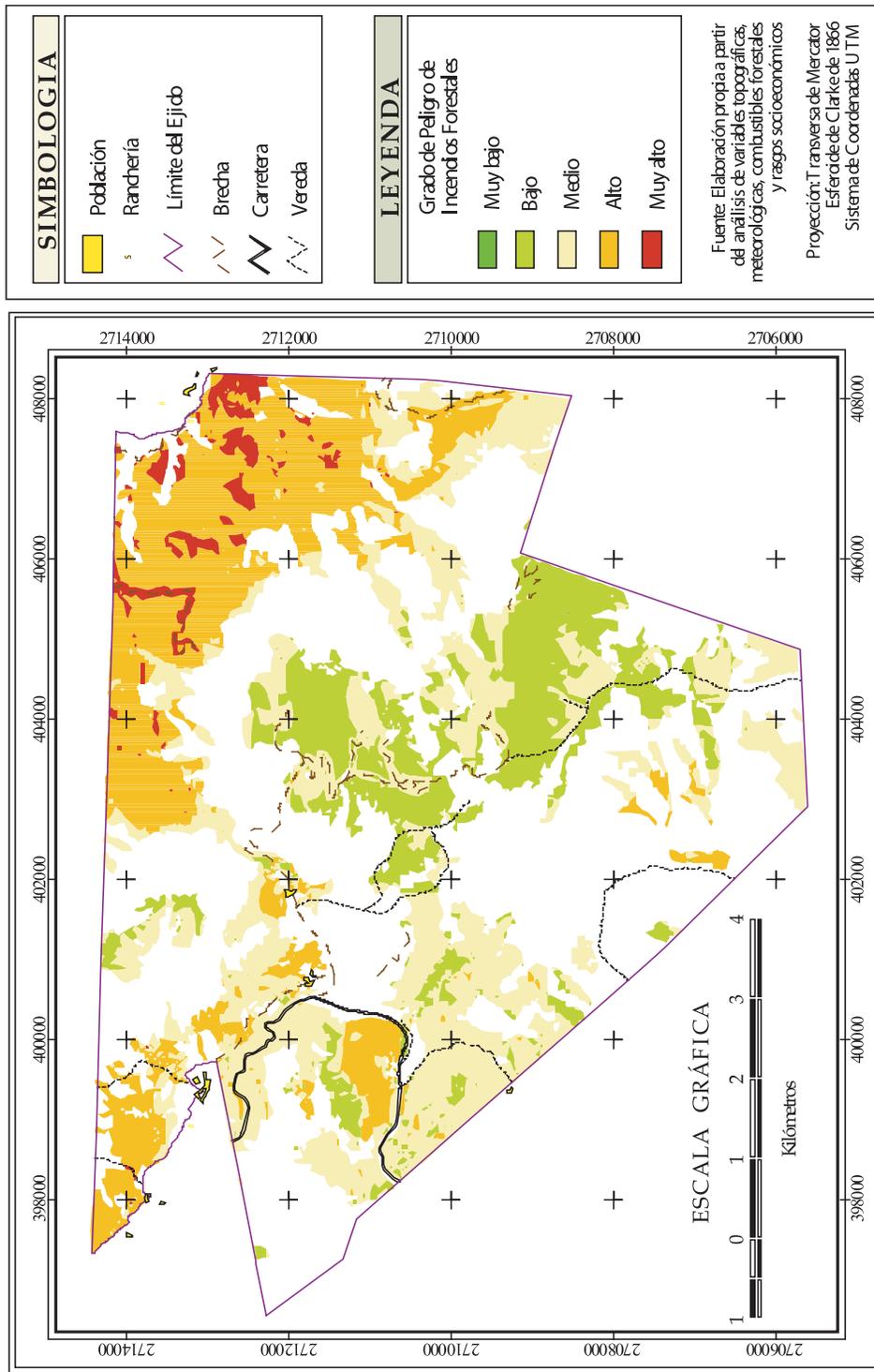


Figura 9. Distribución espacial del peligro de incendios forestales para el mes de abril en el ejido Corona del Rosal.

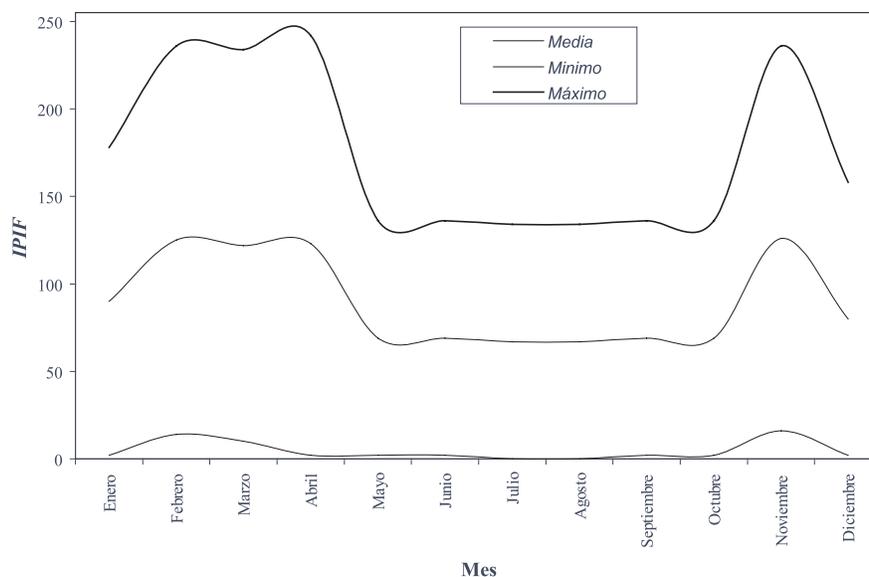


Figura 10. Distribución temporal de los valores estandarizados mínimos, máximos y promedio del Índice de Peligro de Incendios Forestales.

casi por completo la probabilidad de que se produzca un incendio.

CONCLUSIONES

El conocimiento de la distribución del peligro de incendios dentro del ejido Corona del Rosal permitirá planear estrategias de control y combate de incendios forestales, de tal manera que los recursos humanos destinados para las labores de control y combate serán dirigidos a las zonas donde se espera un mayor grado de peligro.

La metodología de evaluación multicriterio demostró requerir de una operación sencilla y con resultados suficientemente robustos para la estimación del Índice de Peligro de Incendios Forestales, y puede ser aplicada en otras regiones forestales de México. Actualmente se encuentran en desarrollo dos estudios paralelos a éste. Para una escala media se está aplicando el modelo en el Ejido Pueblo Nuevo, Durango, y en el estado de Chihuahua

se aplica para identificar áreas susceptibles de incendios en una escala regional.

Las fuentes de datos obtenidas para construir este modelo son de acceso rápido y se encuentran al alcance de los prestadores de servicios técnicos forestales, lo que facilita la incorporación de esta metodología a un esquema integral de manejo para que proporcione una aproximación en la definición de las áreas susceptibles a incendios forestales.

Finalmente, cabe señalar que es necesaria la incorporación de nuevas variables de las que se cuente con suficientes datos que permitan aumentar la confiabilidad de la cartografía resultante de la aplicación del modelo.

AGRADECIMIENTOS

Al Sistema de Investigación Regional Alfonso Reyes y a la Fundación PRODUCE Nuevo León que, a través del proyecto "Estimación del índice de peligrosidad de incendio en la Sierra

Madre Oriental" (SIREYES 1999 060-6008) apoyaron totalmente la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

Agee, J. K. and M. H. Huff (1987), "Fuel sucesion in a western hemlock Douglas-fir forest", *Canadian Journal of Forest Research*, 17(7), pp. 697-704.

Almeida, R. (1994), *Forest fire risk areas and definition of the prevention priority planning actions using GIS*, EGIS/MARI´. Paris, March 29-April 1.

Alvarado, E. (1986), *Comportamiento del fuego en rodales poco perturbados de Pinus montezumae Lamb.* tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillos, México.

Brown, J. K. (1974), *Handbook for inventorying downed woody material*, USDA Forest Service, General Technical Report INT-16.

Brown, J. K. and T. E. See (1981), *Downed dead woody fuel and biomass in the northern Rocky Mountains*, USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, General Technical Report INT-117, Ogden, UT.

Brown, J. K., R. D. Oberheu and C. M. Johnston (1982), *Handbook for inventorying surface fuels and biomass in the interior west*, USDA Forest Service, General Technical Report INT-129.

Chuvienco, E., F. Salas and C. Vega (2000), "Remote sensing and GIS for long-term fire risk mapping. Megafires Project", in Chuvienco, E. (ed.), *A review of remote sensing methods for the study of large wildland fires*, Universidad de Alcalá, pp. 91-107.

CSIRO Forestry and Forest Products (2000), *Bushfire Behaviour and Management*, <http://www.ffp.csiro.au/nfm/fbm/>

Deeming, J. E., R. E. Burgan and J. D. Cohen (1978), *The National Fire Danger Rating System*, USDA Forest Service, General Technical Report INT-39.

Eastman, R. (1999), *Idrisi32, Guide to GIS and Image*

Processing, volume 2, Clark University, Worcester, USA.

García, E. (1973), *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*, Instituto de Geografía, UNAM, México.

García, V., P. Woodard, S. Titus, P. Adamowicz and B. Lee (1999), "Dos modelos para la predicción de incendios forestales en Whitecourt Forest, Canada", *Investigación Agraria, Sistemas y Recursos Forestales*, 8(1), pp 5-23.

Gouma, V. and A. Chronopoulou-Sereli (1998), "Wildland FIRE danger zoning-A methodology", *International Journal of Wildland Fire*, 8(1), pp. 37-43.

Gutiérrez, M., G. Monedero y A. Sandia (1997), "Diseño de un mapa de incendios de vegetación en el Parque Nacional El Ávila apoyado en Modelos Digitales del Terreno", *Memorias del VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota*, 2-7 de noviembre, Mérida, Venezuela [CD].

Leathwick, J. R. and C. M. Briggs (2001), *Spatial prediction of wildfire hazard across New Zealand*, New Zealand Fire Service Commission, Research report No. 22.

Lee, B. S., M. E. Alexander, B. C. Hawkes, T. J. Lynham, B. J. Stocks and P. Englefield (2002), "Information systems in support of wildland fire management decision making in Canada", *Computers and Electronics in Agriculture*, 37(1-3), pp. 185-198.

Magaña, O. (1985), *Índices de peligro de incendios forestales*, Boletín divulgativo, núm. 70, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, México.

Malczewski, J. (1999), *GIS and Multicriteria decision analysis*, John Wiley & Sons Inc.

Mandallaz, D. and R. Ye (1997), "Prediction of forest fires with Poisson models", *Canadian Journal of Forest Research*, 27(10), pp. 1685-1694.

Marcozzi, M., G. Bovio, D. Mandallaz and P. Bachmann (1994), "Influence of the weather on

- the forest fire danger index in Ticino Canton", *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 145(3), pp. 183-199.
- Mathur, R. S., M. G. Gogate and R. C. Mittal (1984), "Forest fire danger rating indices based on climate - a case study of West Dehra Dun Forest Division", *Indian Forester*, 110(3), pp. 223-241.
- Ninyerola, M., X. Pons and J. Roure (2000), "A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques", *International Journal of Climatology*, 20(14) pp. 1823-1841.
- Salas, F. (1995), *Detección de áreas de riesgo de incendio forestal a partir de los Sistemas de Información Geográfica y la Teledetección*, tesis Doctoral, Universidad de Alcalá de Henares, España.
- Sánchez, J. (1989), "Los incendios forestales y las prioridades de investigación en México", *Congreso Forestal Mexicano*, tomo II, México, pp. 719-723.
- Sánchez, P. O., S. F. Sánchez y C. M. Carretero (1999), *Modelos y cartografía de estimaciones climáticas termopluviométricas para la España peninsular*, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Santillán, P. J. (1993), *Sistema para determinar indicadores de peligro de incendio forestal*, Informe Técnico No. 14, Acuerdo de cooperación en materia forestal entre México y Finlandia.
- SEMARNAP Delegación Federal en Nuevo León (1999), Centro Estatal de Control de Incendios Forestales, <http://beta.semarnap.gob.mx/nl/indexIE.htm>
- SEMARNAT (2001), Estadísticas e indicadores de los recursos forestales, http://www.semarnat.gob.mx/estadisticas_ambientales/estadisticas_am_98/forestales/forestales05.shtml
- Sepúlveda, B. J., C. W. Zúñiga, E. M. Olguín y P. A. Gomero (1999), *Implementación de un sistema de información geográfica para la prevención de incendios forestales en Baja California*, Folleto Científico No. 1, INIFAP, SAGAR, México.
- Stolyarchuk, L. V. (1979), "Structure of the forest fire seasons in the regions west and east of Lake Baikal", *Lesnoe-Khozyaistvo*, no. 7, pp. 57-58.
- Treviño, G. E., P. J. Jiménez y C. O. Aguirre (2000), "Evaluación de las superficies incendiadas en el sur de Nuevo León susceptibles a restauración", *IX Congreso Latinoamericano de Percepción Remota*, Iguazú, Argentina, Sociedad Latinoamericana de Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica, pp. 353-362.
- UCDF No. 1 (1996), *Programa de Manejo Forestal del ejido Alfonso Corona del Rosal*, México.
- Van Wagner, C. E. (1982), *Practical aspects of the line intersect method*, Canadian Forestry Service, Petawawa National Forestry Institute Information, Report PI-X-12.
- Villalpando, F. y E. García (1993), *Agroclimatología del estado de Jalisco*, Universidad de Guadalajara.
- Wanielista, M., R. Kersten and R. Eaglin (1997), *Hydrology*, John Wiley & Sons, Inc., 2a. ed., EUA.
- Wybo, J. L., F. Guarnieri and B. Richard (1995), "Forest-fire danger assessment methods and decision support", *Safety Science*, 20(1), pp. 61-70.
- Zapata, P. C. (1991), *Determinación de indicadores de peligro potencial de incendios forestales con base en la cuantificación del material combustible*, UACH, Chapingo, México.