
ANÁLISIS ESPACIAL DE PELIGRO DE INCENDIOS FORESTALES EN PUEBLA, MÉXICO

ROSA LAURA CARRILLO GARCÍA,
DANTE ARTURO RODRÍGUEZ TREJO, HUBERT TCHIKOUÉ,
ALEJANDRO ISMAEL MONTERROSO RIVAS y JAVIER SANTILLAN PÉREZ

RESUMEN

La gran mayoría de los incendios ocurridos en el mundo son de origen antrópico, provocados principalmente por actividades de cambio de uso del suelo. Se ha indagado poco al respecto y los estudios poco contemplan directamente la influencia del ser humano como variable de peso. Por ello, se propuso demostrar que los incendios forestales están relacionados con la influencia humana y las condiciones ambientales, y que lo anterior se puede plasmar en un índice de peligro de incendios forestales, considerando también la distribución espacial de los incendios forestales en el estado de Puebla, México. Se requirió de información en bases de datos y cartográfica, procesándose en un sistema de información geográfica. Se llevó a cabo un muestreo sistemático con unidades

de 10×10km. Posteriormente se evaluó y construyó un modelo de regresión logística donde las variables significativas fueron: precipitación media anual, exposición del terreno y número de ramales de vías de comunicación, todas con correlación positiva, y número de comunidades rurales con correlación negativa. El mayor peligro de incendio para el estado de Puebla se distribuye en tres zonas: la Sierra Norte de Puebla, el poniente colindando con Tlaxcala, y el sureste colindando con Veracruz, registrándose en esas zonas mayores precipitaciones, mayor número de ramales y menor número de comunidades. Este estudio puede contribuir a la planeación de estrategias de manejo del fuego en el estado.

La gran mayoría de los incendios ocurridos en el mundo son de origen antrópico, por ejemplo, provocados por actividades de cambio de uso del suelo; sin embargo, el fuego es un elemento natural, y la vegetación, la fauna y la sociedad rural lo necesitan (Rodríguez, 1996). El estudio de incendios forestales se incrementó debido a catástrofes como la ocurrida en el barranco Mann en 1949, donde un incendio tomó la vida de 13 combatientes en los EEUU (Wells, 2008). Actualmente se sabe que la ocurrencia de incendios forestales está determinada por condiciones ambientales y

socio-económicas, y los efectos de cada condición varían dependiendo del ecosistema, el espacio y el tiempo (Yang *et al.*, 2007). Los incendios forestales causados por el hombre no son sucesos aleatorios; a menudo se localizan cerca de núcleos habitados y tienden a seguir patrones estacionales, semanales, e incluso diarios (Martell *et al.*, 1987; Todd y Kourtz, 1991).

Gracias al desarrollo de nuevas tecnologías se han diseñado y operado sistemas de percepción remota, aplicándose a la detección de incendios forestales (Flores *et al.*, 2006). Los estudios realizados en México para la estimación del pe-

ligo de incendio han sido relativamente pocos, por ejemplo, el uso de modelos digitales para riesgo aplicando análisis multicriterios del peligro (Rentería, 2004; Muñoz *et al.*, 2005); relación entre fuego forestal, densidad de caminos y extensión de tierra agrícola (Román y Martínez, 2006); modelos digitales para relacionar ocurrencia de incendios y variaciones del clima (Drury y Veblen, 2008); regresión lineal múltiple en siniestralidad (Rodríguez *et al.*, 2008); regresión geográfica ponderada en patrones de ocurrencia (Ávila *et al.*, 2010). Rodríguez *et al.* (2011) usaron regresión logística para desarrollar un índice de peligro para la

PALABRAS CLAVE / Incendios Forestales / Índice de Peligro de Incendio / México / Planeación / Puebla /

Recibido: 23/11/2011. Modificado: 19/09/2012. Aceptado: 21/09/2012.

Rosa Laura Carrillo García. Ingeniera en Recursos Naturales Renovables y M.C. en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Chapingo (UACH), México. Profesora-Investigadora, UACH, México. e-mail: rlcgarcia10@hotmail.com

Dante Arturo Rodríguez Trejo. Ingeniero Forestal, UACH, México. M.C. en Silvicultura y Manejo Forestal, Colegio de Postgraduados, Mexico. Ph.D., University of Florida, EEUU. Profesor Investigador, UACH, Mexico. Dirección: División de Ciencias Forestales, UACH, Chapingo, Edo. de México, C.P. 56230, México. e-mail: dantearturo@yahoo.com

Hubert Tchikoué. Ingeniero Forestal y Doctor en Ciencias Forestales, Universidad de Pinar del Río, Cuba. Profesor Investigador, UACH, Mexico. e-mail: tchikoue@yahoo.com

Alejandro Ismael Monterroso Rivas. Ingeniero en Planeación y Manejo de los Recursos Naturales Renovables, UACH, México. M.C. y Doctor en Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Profesor-Investigador, UACH, México.

Javier Santillan Pérez. Ingeniero Agrónomo, Escuela Nacional de Agricultura, Mexico. M.C. en Silvicultura, UACH, México. Profesor Investigador, UACH, México.

Península de Yucatán, después del Huracán Dean.

Las razones por las que se han desarrollado los estudios citados son la necesidad de predecir los incendios forestales para mejorar el combate y la prevención, reduciendo los daños y aumentando la eficiencia del uso de recursos humanos, materiales y financieros en el manejo del fuego. Los objetivos del presente trabajo son identificar las principales variables que explican la presencia de incendios forestales en Puebla, y proyectar y desplegar cartográficamente su probabilidad de ocurrencia. La hipótesis consiste en demostrar que la relación espacial entre los incendios forestales y las variables ambientales está influenciada por el ser humano, es modelable y contribuye a predecir la probabilidad de incendios forestales. El conocimiento de la distribución del peligro de incendios forestales en Puebla puede contribuir en la planeación de estrategias de manejo del fuego, tales como prevención, control y combate del mismo, garantizando que los recursos serán dirigidos a las zonas con mayor peligro.

Metodos

Área de estudio e intensidad de muestreo

El área de trabajo (Figura 1) fue el estado de Puebla, México, localizado entre los 20°51,6' y 17°49,8'N y los 99°5,4' y 96°43,8'O, con una superficie de 33.919km² (Marín *et al.*, 2009) y 4.693.709 habitantes (INEGI, 2005). Se utilizó el muestreo sistemático y fueron generadas 85 unidades de muestreo de 10x10km con una superficie de 10.000 ha. La superficie muestreada cubrió el 25% de la superficie total del estado.

Variables explicativas

Las variables para la predicción del peligro de incendios forestales

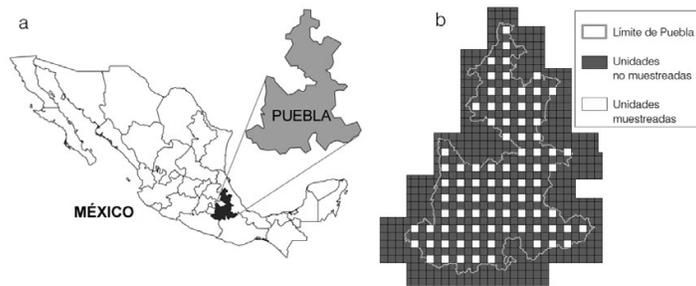


Figura 1. a: Localización del área de estudio, estado de Puebla, México. b: Patrón de muestreo sistemático con 85 unidades.

en Puebla, fueron identificadas consultando diversas fuentes bibliográficas. Fueron consideradas 13 variables (Tabla I) como las más relevantes. Las variables meteorológicas se estimaron para el periodo 2005-2009 (cinco años).

En relación a las variables meteorológicas, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de México proporcionó información de 66 estaciones climatológicas fue extraída del sistema CLICOM de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2007). El análisis de precipitación y temperatura fue realizado con el método empleado por Gómez *et al.* (2008) para obtener modelos con escasa información. La temperatura media anual fue obtenida mediante regresión lineal simple, por medio del comportamiento de la temperatura con respecto a la altitud del terreno. La precipitación media anual se obtuvo utilizando el método gráfico descrito por Gómez *et al.* (2008) y analizando los sistemas de vientos responsables de la misma (Gómez *et al.*, 2011).

Para la pendiente, exposición y altitud (variables topográficas), se procedió a elaborar un modelo de elevación digital con resolución espacial de 30m, generado a partir de curvas de nivel, y posteriormente utilizando el *spatial analysis* del programa ArcGIS 9.3 (ESRI, 2008) para derivar pendientes y exposición. La información obtenida sobre pendiente fue clasificada en siete intervalos (0-5, 5-10, 10-30, 30-50,

50-100, 100-200 y >200%). Para las exposiciones la orientación se obtuvo con el azimut y se clasificó en ocho puntos cardinales (N, NE, E, SE, S, SO, O y NO). Como era de esperarse, todas las exposiciones están presentes en el estado. Típicamente las exposiciones sur son más secas y con mayor peligro de incendios (Schroeder y Burk, 1970).

Respecto a las variables de uso del suelo, la actividad agropecuaria fue expresada en superficie, perímetro y fragmentación a través de evaluar la vegetación y su distribución en cartografía digital de INEGI (2006), agrupando los usos agrícolas (agricultura de temporal, riego y riego eventual) y ganaderos (pastizal cultivado e inducido), extrayéndose la superficie (ha) de cada uno. En cuanto a fragmentación se realizó una sumatoria de fragmentos. Para el perímetro se extrajo la longitud total (km) del contorno de las áreas agropecuarias. En ramificación y longitud de vías de comunicación, se procedió teniendo la distribución de vías (INEGI, 2006), a cual le fue extraída la información realizando una sumatoria de longitudes de las vías y fueron contabilizadas todas las ramificaciones, considerando a las carreteras como vías principales de las cuales se ramifican caminos, brechas y veredas.

La precipitación se expresó en el mapa de precipitación media anual, con intervalos menores de 300mm en zonas de la Depresión del Balsas, hasta más de 3000mm en la Sierra Norte y una parte del sureste de Puebla. Gómez *et al.* (2011), encontraron que la mayor parte del estado tiene precipitaciones menores a los 500mm, semejantes a las encontrados en esta ocasión. La precipitación es el factor principal que incrementa la reserva hídrica del suelo y por consiguiente, a mayor agua disponible para la vegetación, mayor será la producción de biomasa y de combustibles forestales (Schroeder y Burk, 1970).

Las vías de acceso fueron consideradas, pues existen estudios que relacionan número de incendios y densidad de caminos (Román y Martínez, 2006), proximidad de caminos (Muñoz *et al.*, 2005), y número y longitud de caminos (Rodríguez *et al.*, 2011).

Con respecto a las variables sociales, se generó un mapa de localidades en el cual fueron concentradas las variables de número de localidades, población total y población analfabeta, trabajándose con localidades rurales con menos de 15.000 habitantes en la estadística censal (INEGI, 2005), tomando en cuenta los estudios realizados por Rodríguez *et al.* (2008), los cuales muestran que el nivel de alfabetización tiene una correlación negativa con la incidencia de

TABLA I
VARIABLES EXPLICATIVAS ANALIZADAS

Grupo	Clave	Variable	Unidad
Meteorológicas	Tma	Temperatura media anual	°C
	Pma	Precipitación media anual	mm
Topográficas	Xpo	Exposición	Azimut
	Pen	Pendiente	%
	Alt	Altitud	msnm
Uso del suelo	Pea	Actividad agropecuaria (perímetro)	m
	Ara	Actividad agropecuaria (área)	ha
	Fra	Actividad agropecuaria (número de fragmentos)	Fragmentos
	Lov	Vías de comunicación (longitud de caminos)	m
Sociales	Rav	Vías de comunicación (número de ramales de caminos)	Ramales
	Pob	Población total	Personas
	Alf	Población de analfabetas	Personas
	Noc	Número de comunidades rurales	Comunidades

incendios y por Muñoz *et al.* (2005), los que señalan que los factores socioeconómicos (población) tienen el 15% de importancia.

Variable respuesta

La variable dependiente fue la probabilidad de incendios (presencia de puntos de calor) en el cuadro de 10x10km. La localización de los puntos de calor fue proporcionada por CONABIO (2010), correspondientes a un periodo de cinco años (2004-2009). No se consideraron los puntos dentro de áreas agropecuarias, áreas sin vegetación y ciudades, utilizando solamente los denominados incendios forestales. Estos últimos fueron introducidos como variable binaria, recibiendo un valor de 1 si ocurría al menos un incendio y un valor de 0 si no hubo incendio en el cuadro de 10.000ha.

Modelo estadístico

Para el análisis estadístico del peligro de incendios forestales, se utilizó un modelo de regresión logística de Hosmer y Lemeshow (2000):

$$P = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_n X_n)}} \quad (1)$$

donde P: probabilidad de ocurrencia de incendios forestales, e: base de los logaritmos naturales, α : intersección en el eje de ordenadas, β_n : constante asociada a la variable independiente X_n .

El análisis se realizó con el procedimiento *Proc Logistic* del programa *Statistical Analysis System* versión 9.0 (SAS, 2002), introduciéndose 20 modelos. Para evaluar si los parámetros eran significativos se examinaron los parámetros estimados, además de usar los valores del test χ^2 y del estadístico de Wald. Otra forma de evaluar las capacidades predictivas del modelo fue con tablas de clasificación de respuestas observadas y predichas 2x2; el porcentaje total de observaciones predichas correctamente se calcula como (A+D)/(A+B+C+D) donde las letras representan valores de la matriz (A: superior izquierdo, B: superior derecho, C: inferior izquierdo, y D: inferior derecho; Hosmer y Lemeshow, 2000).

Se eligió un modelo de regresión logística debido a que ofrece ventajas sobre otros modelos, tales como métodos cuantitativos basados en multicriterios (Vega, 1994; Chuvieco *et al.*, 1998; Muñoz *et al.*, 2005); distribución binomial negativa; distribución de Poisson; modelos de Martell y People; lógica borrosa (Chuvieco y Martín, 2004); la regresión lineal múltiple (Donoghue y Main, 1985; Rodríguez *et al.*, 2008) y modelos físicos basados en información meteorológica o en modelos de propa-

gación del fuego (Chuvieco y Martín, 2004; Rentería, 2004; Román y Martínez 2006; Drury y Veblen, 2008; Ávila *et al.*, 2010); el modelo probit; y las redes neuronales, en las que las predicciones de la mejor red superaron sólo en un 2% al mejor modelo logístico (Carvacho, 1998; Vega *et al.*, 1999). Las ventajas encontradas al utilizar el modelo logístico son: las variables usadas pueden ser categóricas o continuas, no requiere del principio de normalidad y la variable independiente, si es categórica, puede tomar un valor 1 o 0 en cada observación, dependiendo de una condición predeterminada. Estos valores son ajustados como parte de un modelo que predice la probabilidad, con valores numéricos continuos entre 1 y 0 (Agresti, 1990; Infante y Zarate, 2003; Montgomery, 2004).

Construcción del modelo de peligro de incendios para Puebla

Se estableció una calificación del peligro o grado de peligro (Tabla II) en función de los valores obtenidos para la probabilidad de peligro de incendio forestal (P). Ya establecido el modelo a ser aplicado, éste se introdujo en el programa Surfer 7.00 (Surfer, 1999), obteniéndose la distribución de P por medio de interpolación espacial (Chuvieco y Martín, 2004) para la región de Puebla. La interpolación aplicada por el programa es la denominada *Kriging*, considerado un método geoestadístico que provee a partir de una muestra de puntos, ya sea regular o irregularmente distribuidos, valores estimados de aquellos sitios donde no hay información, sin sesgo y con una varianza mínima conocida (FAO, 2001). Para la validación fueron utilizados 30 datos diferentes a los empleados en el muestreo (2004-2009), utilizando la prueba de Hosmer y Lemeshow (2000).

Resultados y Discusión

Modelo logístico

Se aplicaron análisis de regresión logística utilizando más de 20 modelos. El modelo seleccionado a través de este análisis no incluyó las variables temperatura media anual, pendiente, altitud, perímetro de uso agropecuario, área de uso agropecuario, fragmentación de uso agropecuario, longitud de vías de comunicación, población total y población de analfabetas. Estas variables son consideradas significativas por otros autores, como son los casos de Rodríguez *et al.* (2011) en cuanto al perímetro de áreas agropecuarias; Ávila *et al.* (2010) con respecto a temperatura; Rodríguez *et al.* (2008) con relación a nivel de alfabetización y áreas perturbadas; Román y Martínez (2006) relacionando extensión de

tierras agrícolas y densidad de caminos; y Muñoz *et al.* (2005) referente a temperatura media máxima mensual, distancia a caminos y poblados.

Las variables significativas fueron precipitación media anual ($p=0,0035$), exposición del terreno ($p=0,0059$) y número de ramales de vías de comunicación ($p=0,0011$) que tuvieron correlación positiva, y número de comunidades rurales ($p=0,0017$), que expresó una correlación negativa. Los intervalos de confianza fueron 1,001 a 1,003; 1,338 a 5,665; 1,022 a 1,090 y 0,845 a 0,962, respectivamente. El modelo tuvo una concordancia de 76,6%, una discor-

TABLA II
CATEGORÍAS DE PELIGRO

Probabilidad de ocurrencia	Grado de peligro	Tonalidad asociada
0	-	
0,0 - 0,2	Mínimo	
0,2 - 0,4	Bajo	
0,4 - 0,6	Medio	
0,6 - 0,8	Alto	
0,8 - 1,0	Extremo	

dancia de 23,3%, y clasificó correctamente el 60% de todas las observaciones. Por ello, la probabilidad de que ocurra al menos un incendio en cualquier parte de Puebla, puede estimarse mediante la Ec 2.

$$P = \frac{1}{1 + e^{-(6,2104 + 0,00169(pma) + 1,0127(xpo) + 0,0539(rav) - 0,1035(noc))}} \quad (2)$$

donde P: probabilidad de peligro de incendios forestales, e: número de Euler (2,7182), pma: precipitación media anual (mm), xpo: orientación norte (0) o sur (1), rav: número de ramales de vías de comunicación, y noc: número de comunidades.

Muñoz *et al.* (2005) contemplan a la exposición del terreno como parte de las condiciones meteorológicas que reciben un 60% de importancia en el peligro de incendios forestales, lo que fue confirmado en el presente estudio, ya que la exposición del terreno es la variable que posee un mayor coeficiente en la regresión (1,0127), además de que otros autores la han utilizado en sus investigaciones con buenos resultados para predecir la ocurrencia de incendios forestales (Chou *et al.*, 1993; Rodríguez, 1996; Vega *et al.*, 1999; Chuvieco y Martín, 2004). Cabe destacar que el coeficiente no es el único indicador de importancia en la ecuación; hay que contemplar la naturaleza de la variable, ya que depende de si es continua o discreta y, además, de los valores que puedan tomar éstas para influir en la probabilidad de incendios forestales.

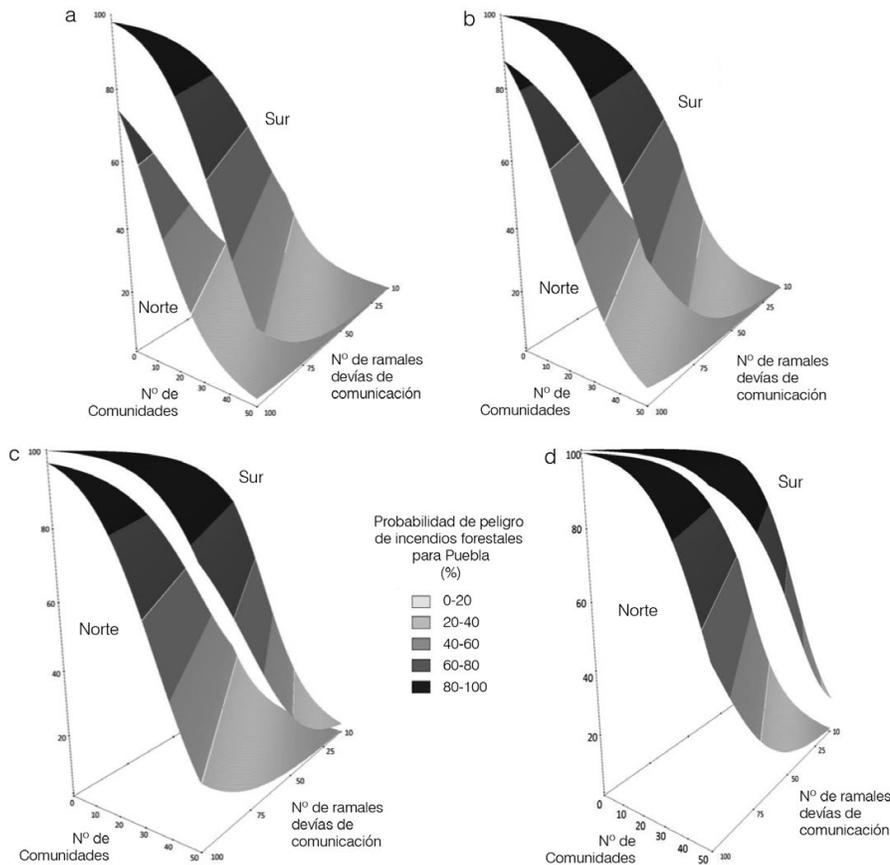


Figura 2. Representación gráfica del modelo logístico general de Puebla para diferentes precipitaciones medias anuales (Pma) de a: 400mm, b: 1.000mm, c: 2.000mm, y d: 3.000mm.

El número de comunidades es el segundo en importancia dentro de la probabilidad de incendios forestales para

Puebla, con una relación inversa. En cambio, otros autores (Martell *et al.*, 1987; Todd y Kourtz, 1991) mencionan que entre más cer-

canas estén las comunidades rurales mayor la presencia de incendios forestales, y Muñoz *et al.* (2005) lo consideran como parte del factor socioeconómico contemplando un 15% de importancia y colocándolo como el tercer componente del peligro de incendios forestales. Para el caso del número de ramales de vías de comunicación, con correlación positiva, Román y Martínez (2006) y Muñoz *et al.* (2005) hallaron que la densidad de caminos y su proximidad se relacionan positivamente con el número de incendios forestales.

El coeficiente más bajo es el de la precipitación media anual, con signo positivo, lo que está relacionado a la productividad vegetal y disponibilidad de combustibles forestales, confirmando lo expuesto por Ávila *et al.* (2010) quienes encontraron que las variaciones climáticas (precipitación) incrementan la probabilidad de ignición. Además, Muñoz *et al.* (2005) mencionan que las condiciones meteorológicas, que incluyen precipitación, recibieron un 60% de importancia. Drury y Veblen (2008) relacionan las variaciones extremas del clima con la ocurrencia de incendios forestales, al igual que otros autores (Vega *et al.*, 1999; Chou *et al.*, 1993 y Chuvieco y Martín, 2004).

En la Figura 2, representación gráfica del modelo obtenido, se observa una probabilidad mayor en regiones con baja densidad de localidades, un número mayor de ramales de vías de comunicación, en exposiciones sur y con precipitaciones mayores, representando lugares con mayor productividad, más carga de combustibles, y por ende más susceptible a incendios forestales. Para confirmar la validez de los resultados fue aplicado el modelo a diferentes observaciones, clasificando correctamente el 65% de ellas. Se contemplan cuatro niveles de precipitación: el 37,9% de la superficie estatal se encuentra con precipitaciones entre 0 y 700mm, siguiendo el comportamiento de la Figura 2a, en cambio, el 46,8% está entre 700 y 1500mm (Figura 2b), el 8,0% entre 1500 y 2500mm (Figura 2c), y el 7,3% supera los 2500mm (Figura 2d).

Mapa de peligro de incendios forestales en Puebla.

El mayor peligro se encuentra en tres zonas: al norte, en la Sierra Norte de Puebla; al oeste, colindando con Tlaxcala, y al sureste con Veracruz como se aprecia en el mapa de la Figura 3.

La Tabla III muestra los grados de peligro de incendios forestales para Puebla, con relación a superficie por intervalo de peligro y con respecto a la superficie forestal del estado.

El 42,3% de la superficie forestal de Puebla se encuentra en grado de peligro mínimo a bajo, 57,7% corresponde a grado de peligro medio, alto y extremo. Tan sólo el

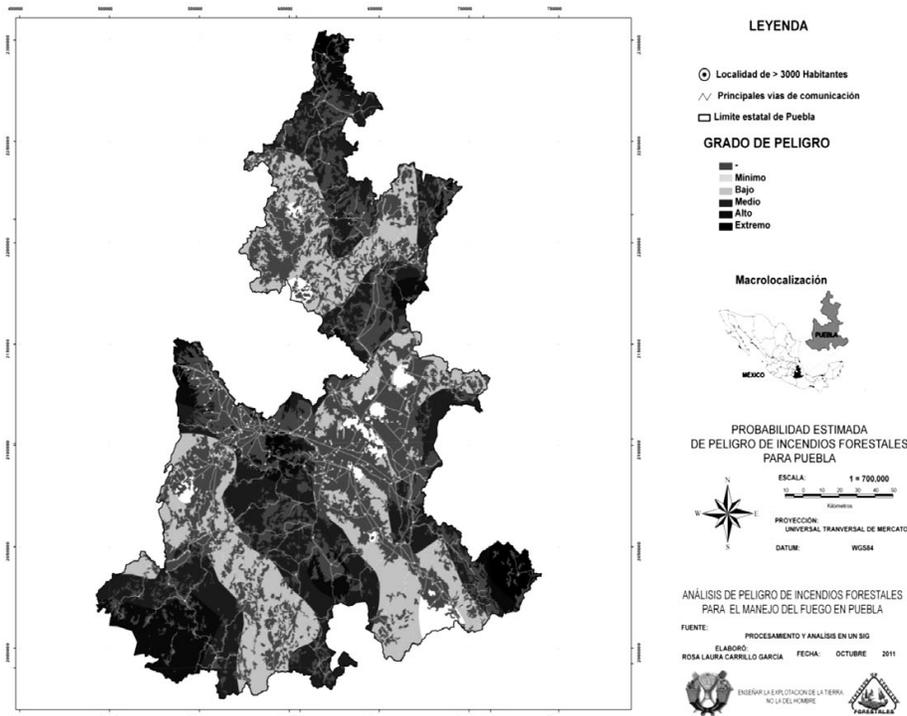


Figura 3. Probabilidad estimada de peligro de incendios forestales para Puebla

TABLA III
SUPERFICIE CON RESPECTO A GRADOS DE PELIGRO
PARA PUEBLA, MÉXICO

Grado de peligro	Probabilidad de ocurrencia	Superficie (ha)	(%)*
-	Cuerpos de agua	4.570	0
-	Zonas Urbanas	47.186	0
-	Agricultura	1.436.769	0
Mínimo	0,0 - 0,2	74.060	3,9
Bajo	0,2 - 0,4	730.453	38,4
Medio	0,4 - 0,6	746.405	39,2
Alto	0,6 - 0,8	315.389	16,5
Extremo	0,8 - 1,0	37.067	2,0
Superficie forestal		1.903.374	100,0
Superficie estatal		3.391.900	

* Con respecto a superficie forestal.

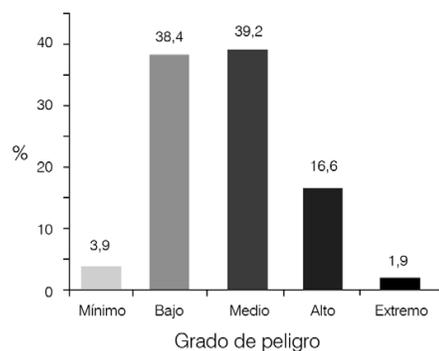


Figura 4. Grado de peligro de incendios forestales para Puebla.

TABLA IV
PORCENTAJE CON RESPECTO A GRADOS DE PELIGRO
POR TIPO DE VEGETACIÓN PARA PUEBLA

Tipo de vegetación	Grado de peligro					% de superficie forestal
	Mínimo 0,0-0,2	Bajo 0,2-0,4	Medio 0,4-0,6	Alto 0,6-0,8	Extremo 0,8-1,0	
Bosque cultivado	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02
Bosque de encino	0,10	1,66	3,49	2,72	0,01	7,97
Bosque de encino-pino	0,03	0,63	0,23	0,11	0,00	1,00
Bosque de oyamel	0,00	0,11	0,56	0,21	0,00	0,88
Bosque de pino	0,64	4,06	2,66	1,52	0,05	8,93
Bosque de pino-encino	0,33	3,52	2,56	0,61	0,00	7,02
Bosque de táscate	0,07	0,43	0,17	0,01	0,00	0,69
Bosque mesófilo de montaña	0,04	1,81	1,84	0,57	0,83	5,10
Chaparral	0,10	1,08	1,57	0,71	0,00	3,45
Matorral crasicaule	0,85	2,79	1,16	0,01	0,00	4,82
Matorral desértico rosetófilo	0,48	3,75	2,61	0,09	0,00	6,94
Mezquital	0,00	0,19	0,01	0,00	0,00	0,19
Sin Vegetación	0,01	0,26	0,17	0,06	0,00	0,51
Palmar	0,00	0,07	0,54	0,38	0,00	0,99
Pastizal	0,87	6,32	8,40	3,84	0,17	19,60
Pradera de alta montaña	0,00	0,04	0,18	0,04	0,00	0,26
Selva alta perennifolia	0,00	0,20	1,24	0,88	0,87	3,19
Selva baja caducifolia	0,37	11,44	11,82	4,78	0,00	28,41
Selva baja espinosa	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,03
Selva mediana subcaducifolia	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tular	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01
% Por grado de peligro	3,89	38,38	39,21	16,57	1,95	100,00

3,9% se encuentra clasificado como mínimo (Figura 4).

El grado de peligro con respecto a los diferentes tipos de vegetación se muestra en la Tabla IV.

Conclusiones

La metodología empleada demostró una operación sencilla y con resultados robustos para estimar la probabilidad de peligro de incendios forestales, por lo que puede ser aplicada en otras regiones e incluir otras variables de carácter socio-económico que resulten significativas.

El modelo de regresión logística utilizado en este estudio demostró que las variables de carácter socio-económico tienen un peso significativo en la probabilidad de ocurrencia de incendios, por lo que es importante considerar al factor humano en la evaluación de riesgo de incendios en el estado.

Tomando en cuenta que en el mapa de peligro de incendios el 57,7% de la superficie corresponde a valores que se encuentran entre medio, alto y extremo grado de peligro, esas áreas son de interés en la implementación de estrategias de manejo para reducir el peligro. Debe darse prioridad

a las áreas con alto y extremo grado de peligro, las cuales alcanzan un 18,5% y cuentan con una superficie de 352.456ha.

El mayor peligro se encuentra en tres zonas, la correspondiente a la Sierra Norte de Puebla, los extremos sureste y suroeste del estado, y una banda con dirección sureste a partir del volcán Iztaccihuatl, al límite del estado de Puebla.

Finalmente, la vegetación más susceptible a presentar incendios forestales incluye: selva baja caducifolia, pastizal, bosque de encino o de encino-pino, y bosque de pino o de pino-encino, con 4,8, 4,0, 2,8 y 2,2% de la superficie forestal del estado, respectivamente, clasificados de alto a extremo grados de peligro.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONACYT la beca crédito a la primera autora. Este trabajo es parte del Proyecto Ajusto de la Universidad Autónoma Chapingo, sobre ecología del fuego, manejo del fuego y restauración de áreas incendiadas.

REFERENCIAS

- Ávila D, Pompa M, Antonio X, Rodríguez DA, Vargas E, Santillán J (2010) Driving factors for forest fire occurrence in Durango State of Mexico: A geospatial perspective. *Chin. Geoga. Sci.* 20: 491-497.
- Carvacho L (1998) Evaluación de la estimación de grandes incendios forestales en la cuenca mediterránea europea por redes neuronales y regresión logística. *Pontificia Universidad Católica de Chile, Instituto de Geografía. Serie Geogr.* 7: 73-85.
- Chou H, Minnich RA, Chase RA (1993) Mapping probability of fire occurrence in San Jacinto Mountains, California, USA. *Env. Manag.* 17: 129-140.
- Chuvieco E, Martín M (2004) *Nuevas Tecnologías para la Estimación del Riesgo de Incendios Forestales*. Instituto de Economía y Geografía. España. 190 pp.
- Chuvieco E, Martín P, Martínez J, Salas J (1998) Geografía e incendios forestales. *Serie Geogr.* 7: 11-17.
- CONABIO (2010) *Programa para la Detección de Puntos de Calor Mediante Técnicas de Percepción Remota. Monitoreo de Puntos de Calor*. CONABIO. México. www.conabio.gob.mx/conocimiento/puntos_calor/doctos/puntos_calor.html (Cons. 08/03/2010).
- Donoghue LR, Main WA (1985) Some factors influencing wildfire occurrence and measurement of fire prevention effectiveness. *J. Env. Manag.* 20: 87-96.
- Drury SA, Veblen TT (2008) Spatial and temporal variability in fire occurrence within the Las Bayas Forestry Reserve, Durango, Mexico. *Plant Ecol.* 197: 299-316.
- ESRI (2008) *Programa ArcMap™ 9.3*. Environmental Systems Research Institute, Inc. Redlands, CA, EEUU.
- FAO (2001) *El Uso de Computadoras, Programas e Instrumentos Electrónicos en la Planificación y Seguimiento de Planes de Manejo del Bosque Húmedo Tropical: Un Caso en Costa Rica*. Organización de las Naciones Unidas

- para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. 75 pp. www.fao.org/docrep/003/c8763s/x8763s00.htm. (Cons. 20/05/2010).
- Flores JG, Rodríguez DA, Estrada O, Sánchez F (2006) *Incendios Forestales: Definiendo el Problema, Ecología y Manejo, Participación Social, Fortalecimiento de Capacidades, Educación y Divulgación*. Mundi-Prensa. México. 254 pp.
- Gómez JD, Etchevers J, Monterroso AI, Gay C, Campo J, Martínez M (2008) Spatial estimation of mean temperature and precipitation in areas of scarce meteorological information. *Atmósfera* 21: 35-56
- Gómez JD, Monterroso AI, Tinoco JA, Toledo ML, Conde C, Gay C (2011) Assessing current and potential patterns of 16 forest species driven by climate change scenarios in México. *Atmósfera* 24: 31-52.
- Hosmer DW, Lemeshow S (2000) *Applied Logistic Regression*. Wiley. Nueva York, EEUU. 392 pp.
- INEGI (2005) *Programa Censo*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México. www.inegi.com.mx (Cons. 04/11/2009).
- INEGI (2006) *Cartografía de Uso de Suelo y Vegetación, y Vías de Comunicación*. Serie III. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México.
- Marín M, López J, Musalem C (2009) Enciclopedia de los Municipios de México: Estado de Puebla. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. Puebla, México.
- co. www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/puebla/ (Cons. 19/04/2010).
- Martell DL, Otukol S, Stocks BJ (1987) A logistic model for predicting daily people-caused fire occurrence in Ontario, Canadian. *J. Forest Res.* 17: 394-401.
- Muñoz CA, Treviño EJ, Verástegui J, Jiménez J, Aguirre OA (2005) Desarrollo de un modelo espacial para la evaluación del peligro de incendios forestales en la sierra madre oriental de México. *Inv. Geogr.* 56: 101-117.
- Rentería JB (2004) *Desarrollo de Modelos para Control de Combustibles en el Manejo de Ecosistemas Forestales en Durango*. Tesis. Universidad Autónoma de Nuevo León. México. 125 pp.
- Rodríguez DA (1996) *Incendios Forestales*. Mundi-Prensa. México. 630 pp.
- Rodríguez DA, Ramírez H, Tchikoué H y Santillán J (2008) Factores que inciden en la siniestralidad de los incendios forestales. *Cienc. Forest.* 33: 37-58.
- Rodríguez DA, Tchikoué H, Cíntora C, Contreras R, de la Rosa A (2011) Combustibles forestales, peligro de incendio y áreas prioritarias de protección en las zonas afectadas por el huracán Dean. *Agrociencia* 45: 593-608.
- Román CR, Martínez MJ (2006) Effectiveness of protected areas in mitigating fire within their boundaries: Case study of Chiapas, Mexico. *Cons. Biol.* 20: 1074-1086.
- SAS (2002) *Statistical Analysis System. Programa para Microcomputadoras*. Version 9.0 SAS Institute Inc. Cary, NC, EEUU.
- Schroeder MJ, Burk CC (1970) *Fire Weather*. Agriculture Handbook 360. Forest Service. USDA. 229 pp
- Surfer (1999) *Programa para Microcomputadoras*. Version 7.00. Golden Software, Inc. Golden, CO, EEUU.
- Todd B, Kourtz PH (1991) *Predicting the Daily Occurrence of People-Caused Forest Fires*. Information Report PI-X-103. Petawawa National Forestry Institute. Chalk River, ON, Canada. 16 pp.
- Vega C (1994) *Predicting Human-Caused Forest Fire Occurrence in Whitecourt Forest, Alberta*. Thesis. University of Alberta. Canada. 117 pp.
- Vega C, Woodard PM, Titus SJ, Adamowicz WL, Lee BS (1999) Dos modelos para la predicción de incendios forestales en Whitecourt Forest, Canada. *Inv. Agric. Sist. Recur. Forest.* 8: 5-23.
- Wells G (2008) The Rothermel FIRE-Spread Model: Still Running Like a Champ. *Fire Sci. Dig.* 2: 1-12.
- WMO (2007) *CLICOM. Mexico Climatological Station Network Data*. World Meteorological Organization. Ginebra, Suiza.
- Yang J, He S, Shifley R (2007) Spatial patterns of modern period human-caused fire occurrence in the Missouri Ozark Highlands. *Forest Sci.* 53: 1-15 pp.

SPATIAL ANALYSIS OF FOREST FIRE DANGER IN PUEBLA, MEXICO

Rosa Laura Carrillo García, Dante Arturo Rodríguez Trejo, Hubert Tchikoué, Alejandro Ismael Monterroso Rivas and Javier Santillan Pérez

SUMMARY

Most fires in the world are of anthropic origin, mainly provoked by activities leading to the change in land use. The few studies that have been performed in this respect do not consider the influence of humans as a variable of importance. Thus, it was aimed to demonstrate that forest fires are related to human influence and environmental conditions, and that this can be reflected in a forest fire danger index, considering also the spatial distribution of forest fires in the State of Puebla, Mexico. The required cartographic information and that obtained from data-bases was processed in a geographic information system. A systematic sampling was carried out in units of 10×10km. Afterwards, a logistic regression model

was evaluated and constructed, where the significant variables were: mean annual precipitation, terrain exposure and number of roads, all with a positive correlation, and number of rural communities, with negative correlation. The highest fire danger for the State of Puebla is distributed in three areas: the Sierra Norte de Puebla, the limits with Tlaxcala on the west, and the limits with Veracruz on the southeast. In all these areas a higher precipitation, larger number of roads and smaller number of communities were recorded. This study can contribute to the planning strategies for fire handling in the state.

ANÁLISE ESPACIAL DE PERIGO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS EM PUEBLA, MÉXICO

Rosa Laura Carrillo García, Dante Arturo Rodríguez Trejo, Hubert Tchikoué, Alejandro Ismael Monterroso Rivas e Javier Santillan Pérez

RESUMO

A grande maioria dos incêndios, ocorridos no mundo são de origem antrópico, provocados principalmente por atividades de mudança de uso do solo. Tem-se indagado pouco ao respeito e os estudos não contemplam diretamente a influência do ser humano como variável de peso. Por isto, foi proposto demonstrar que os incêndios florestais estão relacionados com a influência humana e as condições ambientais, e que o anterior se pode plasmar em um índice de perigo de incêndios florestais, considerando também a distribuição espacial dos incêndios florestais no estado de Puebla, México. Foi requerida informação em bases de dados e informação cartográfica, processando-se em um sistema de informação geográfica. Realizou-

-se uma amostragem sistemática com unidades de 10×10 km. Posteriormente se avaliou e construiu um modelo de regressão logística onde as variáveis significativas foram: precipitação média anual, exposição do terreno e número de ramais de vias de comunicação, todas com correlação positiva, e número de comunidades rurais com correlação negativa. O maior perigo de incêndio para o estado de Puebla se distribui em três zonas: a Sierra Norte de Puebla, o poente adjacente com Tlaxcala, e o sudeste adjacente com Veracruz, registrando-se nessas áreas maiores precipitações, maior número de ramais e menor número de comunidades. Este estudo pode contribuir no planejamento de estratégias de manejo do fogo no estado.