

MODELADO DE DINÁMICA DE SEQUÍAS PARA PREDICCIÓN DE INCENDIOS FORESTALES EN EL ESTADO DE MORELOS, MÉXICO

MATHEMATICAL MODELING OF DROUGHT DYNAMICS FOR PREDICTION OF WILDFIRES IN THE STATE OF MORELOS, MEXICO

Vilchis Francés, A.Y.¹; Díaz-Delgado, C.; Gómez Albores, M.A.; Bâ, K.M.; Becerril Piña, R.; Mastachi Loza, C. A.

Resumen

La sequía se define como un periodo prolongado de escasez de recursos hídricos por debajo de niveles normales, que provoca efectos adversos sobre los sistemas de producción de recursos. Según el IPCC, cada vez más se presentarán episodios de sequía severos por lo que se incrementará el peligro de incendios en el mundo. Sin embargo, los incendios forestales son parte del proceso natural de regeneración y limpieza del ambiente, pero las actividades antropógenas han desequilibrado este proceso. El objetivo de este trabajo consistió en construir un modelo dinámico (diario) de regresión logística, para detección de zonas con peligro por ignición de incendios forestales. La propuesta es aplicada a la región geográfica con coordenadas extremas 18.1845° a 20.4435° de Latitud Norte, y 98.34525° a 100.8495° de Longitud Oeste, que incluye completamente los territorios estatales de Morelos y de México. El periodo disponible de información para construcción del modelo fue de 2006 a 2009, donde se obtuvo una eficiencia del 98 % en la predicción de incendios para el año 2009. Más del 80 % de los incendios forestales ocurridos resultaron con categoría de alto y muy alto peligro de ignición, concentrándose en coberturas de bosques de pino y mesófilo de montaña. Con este tipo de técnicas alternativas, se espera poder coadyuvar en la mitigación de incendios forestales en sitios donde no se cuenta con datos históricos de incendios, así como tomarse de base para la definición de sistemas de alerta temprana contra incendios forestales en el estado de Morelos.

Palabras clave: Déficit de humedad, regresión logística, sequía.

Abstract

Drought is defined as a prolonged period of scarcity of water resources below normal levels, which causes adverse effects on resource production systems. According to the IPCC, more and more severe drought episodes are expected to increase the fire hazard in the world. However, forest fires are part of the natural process of regeneration and cleanliness of the environment, but anthropogenic activities have unbalanced this process. The objective of this work was to construct a dynamic (logistic) logistic regression model for the detection of zones with danger due to ignition of forest fires. The proposal is applied to the geographic region with extreme coordinates 18.1845° to 20.4435° North Latitude, and 98.34525° to 100.8495° West Longitude, which completely includes the state territories of Morelos and Mexico. The available information period for the construction of the model was from 2006 to 2009, where 98% efficiency in fire prediction was obtained for 2009. More than 80% of the forest fires occurred were classified as high and very high danger of ignition, concentrating on pine forest cover and mountain mesophyll. With this type of alternative techniques, it is hoped to be able to contribute to the mitigation of forest fires in places where historical fire data are not available, as well as being used as a basis for the definition of early warning systems against forest fires in the state of Morelos.

Keywords: Moisture deficit, logistic regression, drought.

INTRODUCCIÓN

El fenómeno de sequía no debe verse como un problema, sino como una condición natural y recurrente de algunas regiones del mundo (Rossi et al., 2005 y Birkel, 2006). Su lento desarrollo temporal y amplia cobertura espacial, dificulta determinar el inicio, duración y extensión mientras ocurre. Por tal motivo, resulta complicado definir medidas de mitigación para los severos impactos que ésta genera. Existe una diversidad de estudios que permiten analizar la sequía. Sin embargo,

sigue considerándose como uno de los fenómenos naturales menos comprendido (Fernández et al., 2009). Por la complejidad del fenómeno, los gobiernos aumentan la vulnerabilidad ante la sequía debido a sus propias políticas de manejo de recursos hídricos (PNUD, 2004). Por lo general, estas son acciones reactivas o de emergencia que se aplican cuando se está inmerso en el evento (Arrojo, 2008 y Moneo, 2008). De acuerdo con el reporte del 2008 generado por el grupo intergubernamental de

¹ Universidad Autónoma del Estado de México.
Facultad de Ingeniería, Centro Interamericano de Recursos del Agua.
Carretera Toluca-Atlacomulco km 14.5, Unidad San Cayetano, Toluca México.
ayvilchisf@uaemex.mx, cdiazd@uaemex.mx, magomez@uaemex.mx, khalidou@uaemex.mx, rbecerrilp@uaemex.mx, camastachil@uaemex.mx

expertos sobre el cambio climático (IPCC, 2008), se presentarán muy probablemente episodios de sequía más severos y más largos en el mundo, por lo que disminuirá la disponibilidad del agua tanto espacial como temporalmente y aumentará la competencia por el recurso. Ante este panorama, la Organización de las Naciones Unidas para la Ciencia y la Cultura (UNESCO) recomienda concebir e implementar metodologías para adaptarse a la escasez de agua durante la sequía con objeto de mitigar sus impactos (PNUD, 2004).

Por otra parte, los elementos del tiempo atmosférico tienen influencia en la ignición, propagación y extinción del fuego en un incendio forestal (Bonazountas et al., 2007). El comportamiento de la temperatura ambiental previo a la temporada de incendios, provee información sobresaliente para identificar zonas con potencial de ignición (Arnaldos et al., 2004). A mayor temperatura, el combustible natural (pastos y matorrales) perderá humedad teniendo pocas posibilidades de recuperarla en épocas de estiaje, ya que los valores mayores del déficit de humedad están asociados en estas temporadas (Ruiz y Reyes, 2005). Aunado a la temperatura, la velocidad y dirección del viento, favorecen el calentamiento de los combustibles y la pérdida de humedad de éstos, haciéndose propicios para llegar a temperatura de deshidratación con facilidad y desencadenar el proceso de combustión (Ayala y Olcina, 2002). Asimismo, la radiación solar incide directamente en la humedad relativa del entorno. A un incremento de radiación solar se asocia un decremento de la humedad relativa, misma que reduce el calor necesario para el inicio de la fase de ignición (Villers, 2006). De igual forma, la pendiente y orientación de ladera son factores que contribuyen en la propagación de los incendios (Arnaldos et al., 2004). La pendiente provee continuidad vertical a la vegetación contribuyendo a la proximidad de los combustibles y en la aparición de vientos, que secarán la vegetación al ascender, además de aumentar la velocidad del viento y la formación de corrientes de convección (Ruiz y Reyes, 2005). Por otra parte, la orientación de ladera es la responsable de la cantidad de insolación que reciban los combustibles en las zonas de umbría o solanas, por lo que su influencia se manifestará en la humedad tanto de éstos como del ambiente circundante (Villers, 2006). Las laderas orientadas SW, S y SE (solanas) serán las que reciban mayor cantidad de calor, por lo que los registros de temperatura serán mayores y la humedad de los combustibles será menor. Además, estas zonas serán más propensas a crear corrientes de convección ascendentes (Ruiz y Reyes, 2005).

La precipitación pluvial de las zonas boscosas es la principal fuente de humedad contenida en el suelo, en el ambiente y en los combustibles. Este elemento meteorológico interviene en la formulación de modelos de peligro y riesgo de incendios, a través de la caracterización de su comportamiento regional

como evaluación del déficit de humedad (Julio, 1990). La temporada de incendios forestales está fuertemente vinculada con la temporada de ausencia de precipitación (Ciesla, 1996). Conforme avance el periodo de ausencia de precipitación, aumentará el peligro de incendio, pues los combustibles se encontrarán mayormente deshidratados y la temperatura de ignición podrá alcanzarse en menor tiempo (Villers, 2006).

Los incendios de los ecosistemas forestales son parte del proceso natural de regeneración y limpieza del ambiente. Sin embargo, la intervención del hombre ha desequilibrado este proceso, lo cual ha puesto en riesgo los recursos naturales de su entorno (Martin et al., 1998). En efecto, la ocurrencia y propagación de incendios dependen de las condiciones climatológicas de una región así como de las actividades antrópicas, que definen no solamente los periodos húmedos y secos, sino también las relaciones culturales entre el hombre y el medio (González, 2003). Con base en el régimen de lluvia mensual en México, los meses de febrero, marzo y abril son los más secos del año (CONAGUA, 2012a). Esto provoca que durante esos meses, los periodos de estiaje sean más largos y que los combustibles naturales sean más susceptibles a los incendios de alta severidad (CONAFOR, 2017).

De acuerdo con datos de la FAO (2003), México se encontraba en el 12° sitio a nivel mundial por la superficie forestal con que contaba (33.5 millones de ha de bosques que representaban el 17% del total nacional). Sin embargo, entre 1993 y 2002 se perdieron 3.17 millones de ha de selvas y bosques. Las causas principales de estas pérdidas fueron la deforestación por tala clandestina y controlada, así como el cambio en uso de suelo e incendios forestales (SEMARNAT, 2010). En el 2010, el Estado de México ocupó el 14° lugar a nivel nacional en afectaciones de bosques por causa de incendios, con una tasa promedio anual de 2.8 ha por evento, siendo la media nacional de 19.14 ha en ese año (PROBOSQUE, 2010). Tanto a nivel mundial como nacional, los recursos forestales siguen amenazados por los incendios. Solamente durante la temporada de estiaje del 2016, en el Estado de México se presentaron 1 483 incendios con una pérdida de 5 932 ha, y en el estado de Morelos hubo solo 193 incendios pero con 1 424 ha afectadas (CONAFOR, 2017).

Aunque en México existen esfuerzos institucionales para el manejo de los incendios (Programa operativo de combate y prevención de incendios), año con año las pérdidas continúan reflejándose a través del deterioro del paisaje en el país. Asimismo, las presiones de tipo económico y social a las que está sometido el recurso forestal, colocan a las acciones de manejo y conservación en desventaja ante su continuo aprovechamiento y sobreexplotación (PROBOSQUE, 2010).

Por lo anterior, se requiere diseñar metodologías que permitan alertar, mitigar, controlar y/o detener la pérdida de recursos forestales. Estos procesos pueden darse, por ejemplo, a través del diseño de herramientas de apoyo en la toma de decisiones para alerta y prevención de incendios forestales. El objetivo de este trabajo consistió en construir un modelo dinámico a escala diaria, para detección de zonas de peligro por ignición de incendios. Particularmente se elaboró el modelo para el Estado de México, ya que se cuenta con base de datos de incendios. Posteriormente, se estimó la probabilidad de incendios para el estado de Morelos con base en los datos de cobertura semejante al Estado de México. Este proceso propone el ajuste de un modelo matemático de regresión logística y el empleo del índice de sequía efectiva (EDI, *Effective drought index*, por sus siglas en inglés), denominado y propuesto así por Byun y Wilhite en 1999. Este índice evalúa el progreso del déficit de humedad pluvial con un paso de tiempo diario (Smakhtin y Hughes, 2004), por lo que fue seleccionado para la estimación de indicadores del déficit de humedad. Asimismo, se utilizó el software Idrisi (Eastman, 2012) para procesamiento de imágenes georeferenciadas, mediante sus herramientas de análisis estadístico, el cual facilitó la evaluación espacial de las variables, que en este trabajo se propusieron como las posibles precursoras de la ocurrencia de incendios para los años 2006 a 2009 en la zona de estudio.

MATERIALES

La zona de análisis para aplicación del método propuesto corresponde al territorio completo de los estados de Morelos y de México, ubicados en la parte central de la República Mexicana. Para el análisis de condiciones del déficit de humedad, se tomaron en cuenta las estaciones climatológicas con datos diarios de precipitación (CONAGUA, 2012c). Los años analizados fueron del 2006 al 2009, ya que la base de datos de incendios comprendía el mismo periodo. El año 2009 fue seleccionado para validación del método. Para cuantificar el déficit de humedad en la zona, se toma la información de lluvia para el Estado de México y de Morelos del periodo 1962 a 2009, quedando la base de datos de precipitación diaria, comprendida por 143 y 82 estaciones climatológicas respectivamente. Los datos de viento corresponden a los relacionados con la velocidad máxima mensual registrada de los observatorios sinópticos de: Chapingo, México-DF, Morelia, Pachuca, Puebla, Querétaro, Tlaxcala, Toluca y Tulancingo (CONAGUA, 2012b).

De acuerdo con PROBOSQUE (2010), la temporada de incendios forestales en el Estado de México se encuentra definida en los primeros meses del año, con énfasis en los meses de marzo y abril (66.5% del total de incendios). Los incendios predominantemente se inician entre las 06:00 y las

18:00 horas, enfatizándose en el horario de 12:00 a 15:00 horas, coincidente con las horas de mayor insolación (poco más del 50% de los casos). Las brigadas constituidas para la prevención y combate de incendios en el territorio estatal, atienden de inmediato el aviso de incendio. Por lo que su duración oscila entre 1 y 5 horas mayormente. Por otro lado, los 2.320 incendios registrados en los bosques mexiquenses, impactaron 8.136 ha entre los años 2006 y 2009. La tendencia general son los eventos de áreas menores a 4 ha en el periodo 2006 a 2009. Cabe señalar que el bosque de pino es el más abundante en el Estado de México con 250 574 ha de las 740 981 ha totales. Por lo tanto, esta especie es la más afectada por los incendios forestales con el 50%, seguidos los bosques de encino y oyamel con el 28% y 13%, respectivamente (PROBOSQUE, 2010).

Con respecto a las causas que provocan incendios, se destaca la vinculación estrecha entre las actividades agrícolas y pecuarias con el origen de éstos. Dado que la práctica de la quema-roza es habitual y frecuentemente, se sale de control por el imprevisto cambio de dirección del viento, lo que se traduce en que el 35% de los eventos tienen este inicio. Misma correlación existe con causas no determinadas, que representan el 30%, de las que según los brigadistas son provocadas por los agricultores, sin embargo no lo hacen constar así en los reportes, pues no es posible su demostración. Por otro lado, las zonas boscosas son tradicionalmente frecuentadas por paseantes de fin de semana o en periodos vacacionales, por lo que las fogatas de las que hacen uso y que no son ahogadas totalmente suelen reactivarse y transferirse a la vegetación, provocando el 17% de los eventos. Otra actividad que integra las causas comunes de ignición son las actividades forestales con el 11% (PROBOSQUE, 2010).

MÉTODO

1. Estimación de indicadores para déficit de humedad

El índice de sequía efectiva propuesto por Byun y Wilhite (1999), se introduce el concepto de precipitación efectiva EP (*Effective precipitation*, por sus siglas en inglés) como la reducción diaria de la precipitación a través del tiempo. Donde la duración de días precedentes para cálculo de EP puede ser de 15 días para los recursos totales de agua almacenada en el suelo para un corto periodo, ó 365 días para recursos hídricos disponibles en todo el ciclo hidrológico. Para este estudio, se utilizó un valor de 15 días anteriores para cálculo de EP, por considerarlo como el periodo más significativo del contenido de agua en la cobertura incendiabile. La disminución de la precipitación a través del tiempo se calcula con la ecuación 1. Se utiliza la precipitación

de m días anteriores que se agrega al total de los recursos de agua como una forma del promedio de precipitación de los m días (Byun and Lee, 2002).

$$EP_i = \sum_{n=1}^i \left(\sum_{m=1}^n P_m / n \right) \quad (1)$$

Donde EP_i es la precipitación efectiva diaria (mm); P_m es la precipitación de m días anteriores (mm) e i es la duración de la suma de los días anteriores. La obtención de la media de EP (MEP) se estima como el promedio móvil de 5 días anteriores de EP. Después se calcula la desviación de EP con respecto a MEP (ecuación 2), al cual se le denomina desviación de EP (DEP, Deviation of EP por sus siglas en inglés).

$$DEP_i = EP_i - MEP_i \quad (2)$$

En la cual DEP_i es la desviación de EP_i respecto a MEP (mm) y MEP_i es la media de la precipitación efectiva (mm). Con DEP_i se estima el segundo indicador al que se le denomina precipitación efectiva estandarizada (SEP , *Standardized value of DEP* por sus siglas en inglés), ecuación 3.

$$SEP_i = \frac{DEP_i}{std(EP_i)} \quad (3)$$

Donde SEP_i es la precipitación estandarizada de EP_i y $Std(EP_i)$ es la desviación estándar de cada día de EP_i , en este caso, para cada dato se incorpora

una media móvil de 5 días anteriores de desviación estándar.

Con el cálculo de SEP es posible identificar el déficit de humedad normalizado (valores negativos de SEP) en cada una de las estaciones de observación. Por lo tanto el déficit acumulado de humedad a nivel diario ANES (*Accumulation of consecutive negative SEP*, por sus siglas en inglés), se estima como la suma de valores de SEP negativos consecutivos en un periodo con déficit de humedad. Finalmente, de acuerdo con el número de días consecutivos con déficit de EP estandarizada en cada periodo con déficit, se obtiene el indicador CNS (*Consecutive days of negative SEP*, por sus siglas en inglés) con el cual se determina la duración de cada periodo con déficit de humedad en la zona de análisis. Para el objeto de este estudio y en lo subsecuente, se llamarán las últimas variables como: ANES (Déficit acumulado de humedad) y CNS (Días con déficit de humedad).

2. Identificación de regiones homogéneas

Primeramente se construyen imágenes territoriales de las distintas variables que se tomarán en cuenta para la identificación de regiones homogéneas. Variables de incendios como amplitud de afectación, la duración, la hora de inicio y la carga de combustible disponible. Variables de tipo geográfico como latitud y longitud. Variables meteorológicas como el déficit de humedad (ANES y CNS), así como variables de cobertura de suelos (cuadro 1).

Cuadro 1. Variables para identificación de regiones homogéneas

TIPO DE VARIABLE	CARACTERÍSTICA
INCENDIOS	1. Amplitud de afectación (ha) 2. Duración (hrs) 3. Hora de inicio (hrs) 4. Carga de combustible (Ton/ha)
GEOGRÁFICA	1. Latitud (grados) 2. Longitud (grados) 3. Orientación de laderas (grados) 4. Pendiente de laderas (grados)
CLIMATOLÓGICA	1. CNS: días con déficit de humedad (días) 2. ANES: déficit de humedad (mm) 3. Viento máximo mensual promedio (m/s)
SUELOS	1. Cobertura y tipo de suelo

Después, se continúa con la identificación de las variables de restricción como la carga de combustible y tipo de suelo tanto para el Estado de México como para el estado de Morelos. Para la definición de esta carga, se toma en cuenta el modelo de la *National Fire Rating System* (NFDRS) de Estados Unidos, asignando los valores de carga de acuerdo con la cobertura vegetal del Estado

de México (PROBOSQUE, 2010). Por lo tanto, se consideran tres tipos de carga de combustible: 8.59 Ton/ha para el bosque de encino (*Quercus rugosa*, *Q. macrophylla*, *Q. crassipes*, *Q. elliptica*, *Q. acutifolia* y *Q. castanea*), bosque de oyamel (*Abies religiosa*) y bosque de otras coníferas como las especies de tásquete *Juniperus spp* (*Juniperus 26 laccida* y *J. deppeana*); 12.34 T/ha para el

bosque mesófilo de montaña (*Cornus disciflora*, *Garrya laurifolia*, *Meliosma dentata*, *Oreopanax xalapensis*, *Prunus spp*, y *Quercus laurina*); y 29.68 Ton/ha para bosque de pino (*Pinus douglassiana*, *P. michoacana*, *P. montezumae*, *P. pseudostrobus* y *P. teocote*) (Nava et al., 2010). Los tipos de cobertura por el tipo de suelo que le corresponde a cada carga de combustible son: para la carga 1, bosques de encino y oyamel (cobertura 1); para la carga 2, selva baja caducifolia (cobertura 2); y para carga 3, bosques de pino y mesófilo de montaña

(cobertura 3). Para el caso del estado de Morelos, las coberturas que se toman en cuenta son las mismas que para el Estado de México, cobertura 1: bosques de encino, oyamel y táscate; cobertura 2: bosque mesófilo de montaña y cobertura 3: bosques de pino. Cabe mencionar que el Estado de Morelos solamente tiene estos tipos de coberturas en las partes altas y colindantes con el Estado de México y el Distrito Federal. Los tipos de coberturas vegetales que se usan para el análisis de este proyecto se muestran en la figura 1.

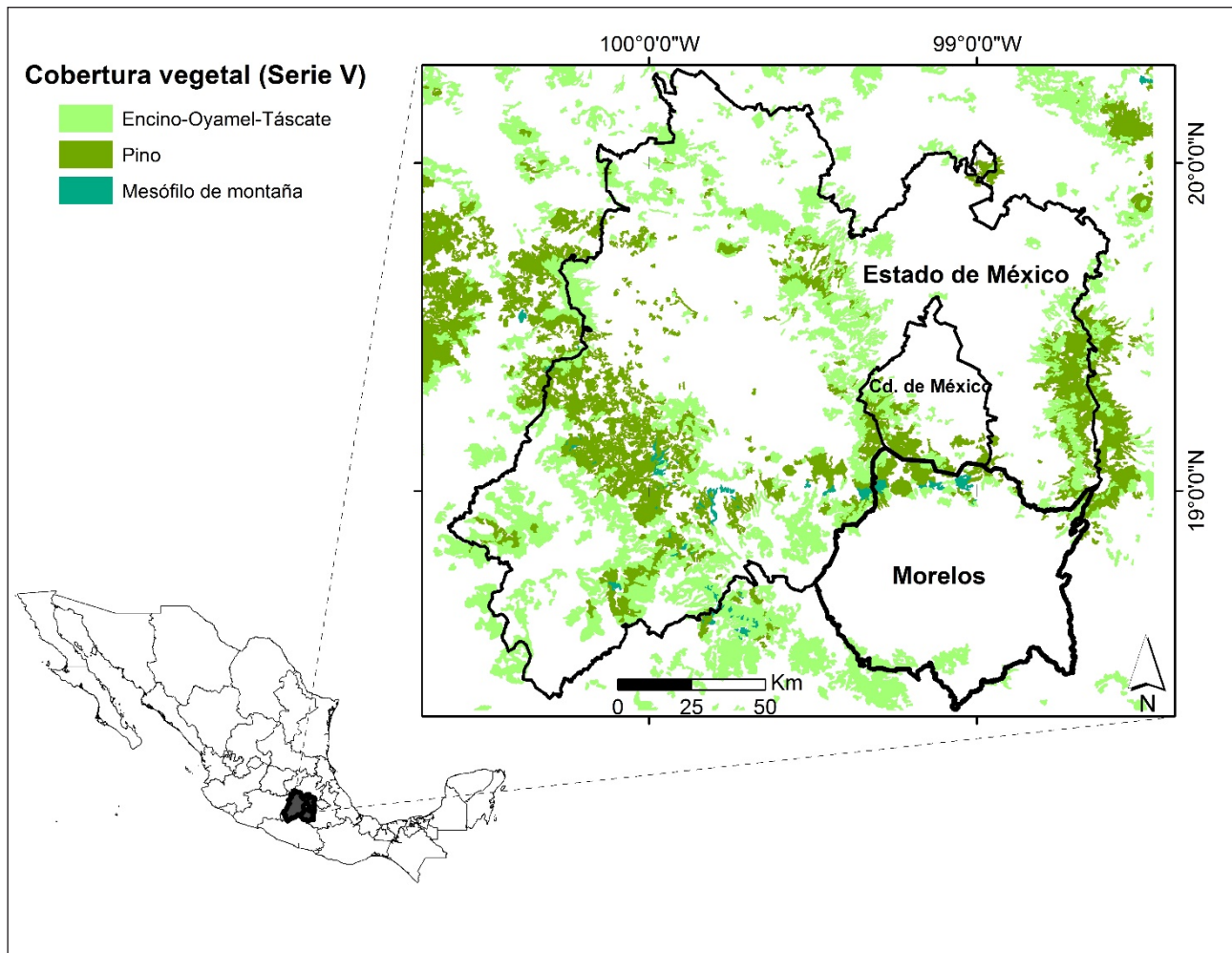


Figura 1. Coberturas vegetales análogas en el Estado de México y el estado de Morelos.

Una vez obtenidas las imágenes de restricción, se realiza el análisis de componentes principales (ACP) con el software idrisi, basado en matrices de correlaciones y covarianzas (ecuación 4), para identificar las combinaciones de variables que más incidencia tienen en la formación de grupos. Los nuevos componentes principales, serán una combinación lineal de las variables originales, y además serán independientes entre sí (Kanellou et al., 2012).

$$S = \sum_{i=1}^N \frac{XY}{\sigma_x \sigma_y} \quad (4)$$

Donde S es el producto normalizado de dos variables; N es el total de observaciones de las variables X e Y; σ_x es la desviación estándar de la variable X y σ_y es la desviación estándar de la variable Y.

Después, se forma el primer grupo con todas las variables independientes (amplitud de incendio, duración de incendio, inicio de incendio, latitud, longitud, CNS y ANES). Luego se obtiene el nivel de significancia del grupo por ACP. Después se elimina la variable que presenta mayor correlación con otra de las variables y vuelve a realizarse el ACP para obtener el nivel de significancia del nuevo grupo. El proceso continúa hasta que se agotan las

combinaciones de variables, con la selección de la mejor significancia y el menor número de variables.

3. Construcción del modelo de regresión logística

El modelo se construye con la identificación de una variable dependiente y diversas variables independientes, de acuerdo con el modelo de Hosmer y Lemeshow (2000). Solamente la variable dependiente es del tipo dicotómica, en la cual se asigna el valor de 1 para la ocurrencia del fenómeno en estudio y 0 para el caso contrario. La base del modelo está identificada por las ecuaciones 5 y 6:

$$f(z) = \frac{1}{1+e^{-z}} \quad (5)$$

$$z = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_kx_k \quad (6)$$

En la cual β_0 es la constante de la regresión y β_k el factor de ponderación de la variable x_k . El resultado de la función $f(z)$ será un valor para cada celda entre 0 y 1 que estima la probabilidad de ocurrencia del fenómeno.

En este trabajo, la variable dependiente es identificada como la amplitud de afectación de los incendios. Se eligió esta variable debido a que más del 80% de los eventos de 2006 a 2009 se presentaron en un área menor de 4 ha. Como variables dependientes se consideran: CNS, pendiente, orientación de laderas y viento (cuadro 1). Se integra el modelo de regresión logística para cada una de las zonas semejantes y para el semestre de análisis (enero-junio). Así mismo, el software idrisi proporciona un coeficiente de ajuste de la regresión logística llamado ROC (*Relative Operating Characteristic*, ROC por sus siglas en inglés). El ROC es un estadístico excelente que evalúa la validez espacial (entre mapas booleanos) del modelo de regresión logística,

para pronosticar la ubicación de ocurrencia de una clase comparado con una idea de referencia, que es el mapa de la realidad contra mapa de conveniencia (Pontius, 2002). Si ROC es igual a 1, demuestra una asociación perfecta entre las variables analizadas; si ROC es menor a 0.5, demuestra un ajuste aleatorio entre las variables. Para comprobar la efectividad del método propuesto a través de regresión logística multivariable, se efectúa su validación con los datos diarios para incendios correspondientes a un año. Para que sea un buen modelo de ajuste, se espera que al menos el 75% de los datos del modelo coincidan con los datos reales del año por validar.

RESULTADOS

Para el Estado de México, se encontró que las características con más influencia en la agrupación de zonas semejantes por medio del ACP fueron CNS y latitud. Con estas variables, se utilizó el método de análisis jerárquico de agrupamiento, para obtener espacialmente las tres coberturas con características homogéneas (figura 2). El modelo se integró por tres sub-modelos, donde cada uno corresponde al tipo de zona homogénea, de acuerdo con las variables que provocan mayormente los incendios como: orientación y pendiente de laderas, velocidad del viento y días con déficit de humedad (cuadro 2). Los resultados de probabilidad de ocurrencia (P) se ordenaron de mayor a menor para proponer cuatro categorías de peligro de ignición de incendios de acuerdo con el porcentaje acumulado de observaciones. La categoría denominada peligro “BAJO” fue para el 5% de los datos, con valores de probabilidad de ocurrencia $P < 0.678$. La categoría de peligro “MODERADO” para el 15% acumulado de datos, con valores de probabilidad $P = [0.678, 0.758]$. Finalmente, para las categorías de peligro “ALTO” y “MUY ALTO” con el 30% y mayor al 50% de datos acumulados, sus probabilidades de ocurrencia fueron $P = [0.758, 0.820]$ y $P > 0.820$ respectivamente.

Cuadro 2. Ecuaciones generales para probabilidad de incendios

Semestre	Cobertura	ROC	Coeficientes de las variables				
			Bo	Fija	Diaria	Fija	Mensual
				B1	B2	B3	B4
			Orientación	CNS	Pendiente	Velocidad viento	
1	0.96	-6.11	2.55	-3.78	-3.33	12.72	
Ene-Jun	2	1	-17.82	23.97	25.87	0	0
	3	0.97	-7.85	-1.51	3.1	0.91	7.47

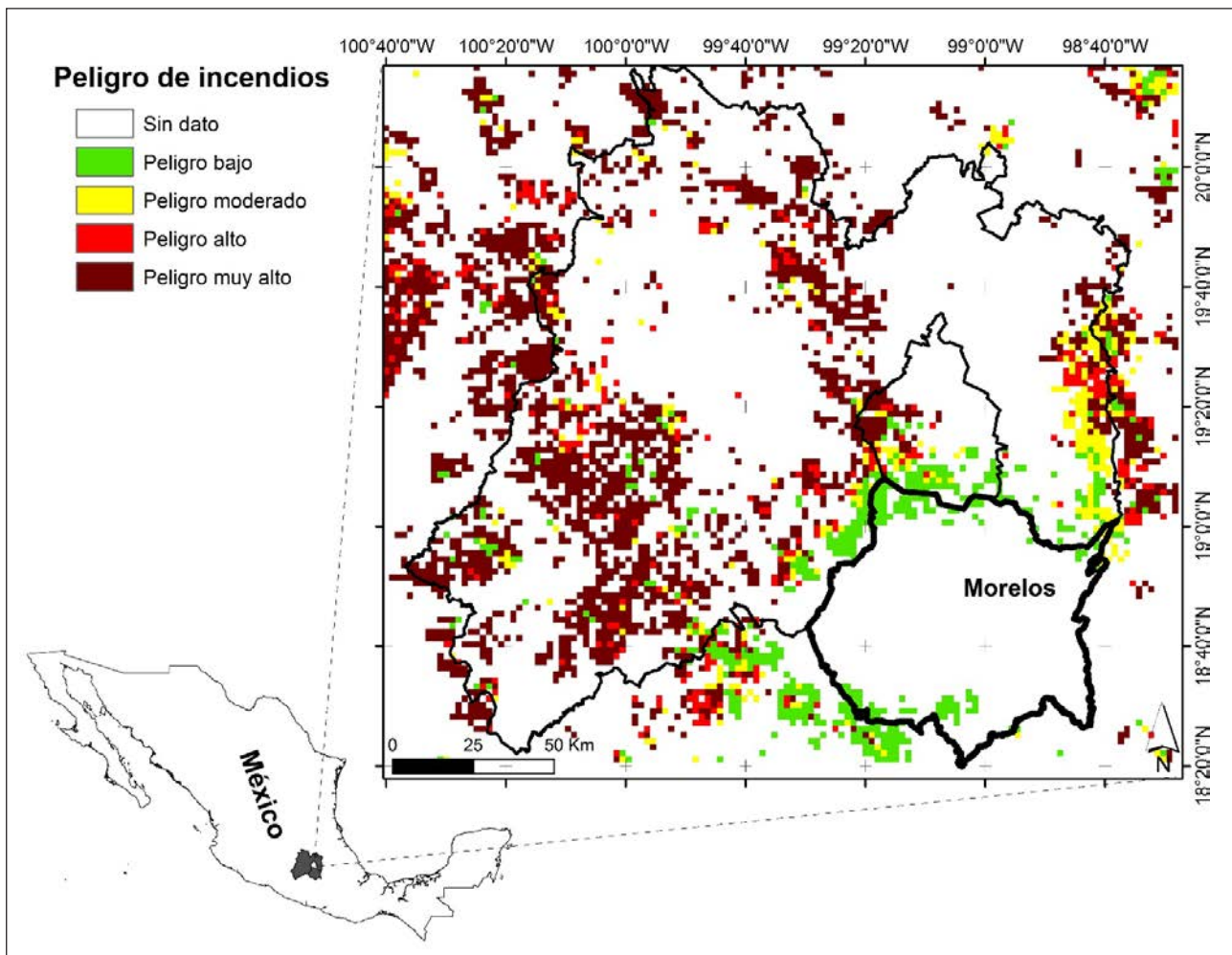


Figura 2. Peligro de incendios en el Estado de México y estado de Morelos.

De los eventos ocurridos del año 2006 al 2009, más del 80% de éstos resultaron con una clasificación de alto y muy alto peligro de incendio, correspondiente a una probabilidad mayor de 0.758, debido a que convergieron los valores de las variables más favorables para la ocurrencia de incendios en los sitios de análisis. Asimismo, se observó que de acuerdo con las características similares del estado de Morelos, como tipo de cobertura, orientación y pendiente de laderas, pudo estimarse la presencia de incendios en el territorio morelense (figura 2).

De acuerdo con la literatura consultada, estudios como el de Carrillo et al. (2012) propusieron un modelo de peligro de incendios forestales para el estado de Puebla (México), el cual consistió en un modelo estático de características que favorecen los incendios forestales. Otras investigaciones como las reportadas por Vilar (2006), Martínez et al. (2008) y Vega et al. (2008) se centran particularmente en establecer la influencia antrópica en la ocurrencia de incendios forestales.

CONCLUSIONES

Se demostró que esta metodología tiene una efectividad del 98 % para predicción de condiciones propicias de ocurrencia de incendios forestales para el Estado de México. Cabe mencionar que este análisis fue acotado solamente para coberturas de coníferas (bosques de: pino, oyamel, encino, táscate y mesófilo de montaña), que para el estado de Morelos, estas coberturas representan tan sólo un 10% de su superficie estatal. Para futuros estudios más completos, deberán analizarse coberturas de selva caducifolia, pastizales y matorrales, que son las coberturas vegetales que más tiene el estado de Morelos. También sería necesario que el estado de Morelos pudiera conformar una base de datos de incendios ocurridos (geolocalización del sitio afectado, cobertura afectada, amplitud del área afectada, etc.), para validar en esta región, la certidumbre del método propuesto.

Esta propuesta puede mejorar los sistemas de alerta contra incendios ya instalados, y en consecuencia,

mejorar los tiempos y protocolos de respuesta en el control de éstos, así como mejorar el diseño de la cadena de suministro, al instalar en zonas estratégicas los centros de control y mando de brigadistas.

Se observaron algunas carencias en la información de tipo climatológico, particularmente se requiere, además de la medición de las variables clásicas, estudios de tipo geoestadístico para determinación de la ubicación idónea de estaciones climatológicas complementarias, que midan en tiempo real datos de humedad del suelo, dirección y velocidad de viento.

Asimismo, se espera que con este tipo de métodos, se ayude en la identificación y mitigación de incendios forestales en sitios donde no se cuente con datos históricos de estos eventos, así como tomarse de base para la definición de sistemas de alerta contra incendios forestales en el estado de Morelos.

Finalmente, esta investigación pretende auxiliar en la formulación de elementos básicos de planeación estratégica para el control y mitigación de impactos ambientales y económicos por incendios forestales en cualquier región, pero particularmente para aquellas entidades que no cuenten con bases de datos diarios de incendios.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) el apoyo otorgado bajo la modalidad de Proyectos de Desarrollo Científico para atender Problemas Nacionales 2014, con número de financiación 248498.

REFERENCIAS

Arnaldos, J., Navalón, X., y Pastor, E. 2004 Manual de ingeniería básica para la prevención y extinción de incendios forestales. Ed. Mundi-Prensa. ISBN: 9788484761204. España. 414 p.

Arrojo A., P. 2008. Prevenir las sequías desde la planificación en perspectivas de cambio climático. Revista ambiente junio de 2008, pp. 34-40. España.

Birkel D, Ch. 2006. Sequía hidrológica en Costa Rica ¿Se han vuelto más severas y frecuentes en los últimos años?. Revista Reflexiones No. 85 (1-2), pp. 107-116.

Ayala, F.J. y Olcina, J. 2002. Riesgos naturales. Ed. Ariel Ciencia. ISBN: 84-344-8034-4. España. 1512 p.

Bonazountas, M., Kallidromitou, D., Kassomenos, P. y Passas, N. 2007. A decision support system for managing forest fire casualties. Journal of Environmental Management 84: 412-418.

Byun, R. y Lee, K. 2002. Defining three rainy seasons and the hydrological summer monsoon in Korea using available water resources index. Journal of the Meteorological Society of Japan, 80-1: 33-44.

Byun, R. y Wilhite, A. 1999. Objective quantification of drought severity and duration. Journal of Climate. American Meteorological Society. September 12: 2747-2756.

Carrillo, R.L., Rodríguez, D., Techikoué, H., Monterroso, I. y Santillán, J. 2012. Análisis de peligro espacial de peligro de incendios forestales en Puebla, México. Interciencia. Septiembre 37-9: 678-683.

Ciesla, M. 1996. Cambio climático, bosques y ordenación forestal. Estudio FAO Montes 126. Roma. 146 p.

CONAFOR, Comisión Nacional Forestal (2017). Temporada de incendios 2016, alerta ante sequía. Disponible en línea [Página consultada 26-junio-2017]: <http://www.conafor.gob.mx/portal/index.php/component/content/article/6/356>.

CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. 2012a. Estadísticas del agua en México, edición 2011. Comisión Nacional del Agua-CONAGUA. México. 132 p.

CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. 2012b. Comisión Nacional del Agua - Servicio Meteorológico Nacional. Información de Observatorios Sinópticos de México. Disponible en línea [Página consultada 16-marzo-2012]: http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=29&Itemid=93.

CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. 2012c. Comisión Nacional del Agua - Servicio Meteorológico Nacional. Información de estaciones climatológicas normales en México. Disponible en línea [Página consultada enero 2012]: http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75..

Eastman, R. 2012. Idrisi Selva Manual. Clark University. Sitio web: www.clarklabs.org

FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (2003). XII Congreso Forestal Mundial. Canadá. Disponible en: <http://www.fao.org/forestry/5387/es/>. [Página consultada diciembre 2011].

Fernández R., A. O., González, Y.A. y Faife, F. N. 2009. Análisis espacio-temporal de sequías meteorológicas en la cuenca hidrográfica Guantánamo-Guaso, mediante el índice de precipitación estandarizada. Voluntad Hidráulica, pp. 22-29. Cuba.

González Y. 2003. Modelos de riesgo de incendios en coberturas vegetales "Región Andina". XII World Forestry Congress Québec. 6 p.

Hosmer W and Lemeshow L. (2000). Applied Logistic Regression. 2nd ed. JohnWiley and Sons, Inc. New York. 392 p.

IPCC. 2008. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. (Pachauri, R. K. y Reisinger, A. –editores-). 1a. impresión 2008, 114p. Suecia.

- Julio G. 1990. Diseño de índices de riesgo de incendios forestales para Chile. Bosque Valdivia. Chile.11-2: 59-72.
- Kanellou, C, Spyropoulos, V, y Dalezios, R. 2012. Geoinformatic intelligence methodologies for drought spatiotemporal variability in Greece. *Water Resources Management*. 26: 2089-1106.
- Martin, M.P., Chuvieco, E. y Aguado, I. 1998. La incidencia de los incendios forestales en España. *Serie Geográfica*. 7: 23-36.
- Martínez, J., Chuvieco, E. y Martín, P. 2008. Estimación de Factores de Riesgo Humano de Ignición en España Mediante Regresión Logística. *Memorias del Segundo Simposio Internacional Sobre Políticas, Planificación y Economía de los Programas de Protección Contra Incendios Forestales: Una Visión Global*. pp. 281-293.
- Moneo L., M. 2008. Drought and climate change impacts on water resources: management alternatives. Tesis doctoral del departamento de economía y ciencias sociales agrarias 373p. Universidad Politécnica de Madrid. España.
- Nava, G, Endara, A, Regil, H, Estrada, C, Arriaga, C.M. y Franco, S. 2010. Los bosques y selvas del estado de México. Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales. Universidad Autónoma del Estado de México. ISBN 9786074220988. México.
- Pontius, G. 2002. Statistical methods to partition effects of quantity and location during comparison of categorical maps at multiple resolutions. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 68-10: 1041-1049.
- PNUD. 2004. La reducción de riesgos de desastres: un desafío para el desarrollo. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). 157p. EEUU.
- PROBOSQUE, Protectora de Bosques del Estado de México. 2010. Programa de prevención y combate de incendios. México. Disponible en línea [Página consultada noviembre de 2010]: <http://www.edomex.gob.mx/portal/page/portal/probosque/proteccion/incendios>.
- Rossi, G., Cancelliere, A. y Giuliano, G. 2005. Case study: multicriteria assessment of drought mitigation measures. *Journal of water resources planning and management*. ASCE November-December 2005, pp. 449-457.
- Ruiz S., J. D., y Reyes, P., F. J. 2005. Geografía física aplicada. Serie: Manuales. Universidad de Málaga España.
- SEMARNAT, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2010. Inventarios forestales de México. Disponible en línea [Página consultada en noviembre de 2010]: http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_R_RFORESTA01_01&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce.
- Smakhtin, U. y Hughes, A. 2004. Review, Automated Estimation and Analyses of Drought Indices in South Asia, IWMI Working Paper No. 83 – Drought Series Paper N 1. IWMI: Colombo; 24 p.
- Veja, C., Ortiz, Ch., Canet, R., Sánchez, I. y Queralt, D. 2008. Practical Application of a Daily Prediction Model for the Occurrence of Human-Caused Forest Fires in Catalonia. *Proceedings of the Second International Symposium on Fire Economics, Planning, and Policy: A Global View*. pp. 567-579.
- Vilar, L. 2006. Empleo de regresión logística para la obtención de modelos de riesgo humano de incendios forestales. XII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica, Granada. pp. 531-543. Disponible en línea [Página consultada octubre 2011]: http://www.geogra.uah.es/firemap/pdf/VilardelHoyo_Granada.pdf.
- Villers, L. 2006. Incendios forestales. *Ciencias*. Enero-Marzo 081: 61-66.