



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

**ANÁLISIS ESPACIAL DE LA OCURRENCIA
DE INCENDIOS FORESTALES EN EL
ESTADO DE DURANGO**

**TESIS
QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

PRESENTA:

DIANA YEMILET AVILA FLORES



CHAPINGO, MÉXICO, DICIEMBRE DE 2009.



Análisis espacial de ocurrencia de incendios forestales en el estado de Durango

Tesis realizada por **Diana Yemilet Avila Flores** bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobado por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

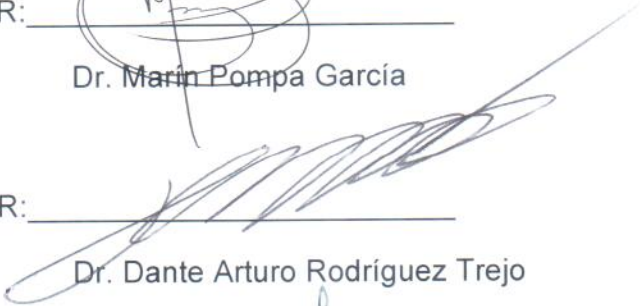
MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

DIRECTOR: 

M.C. Eduardo Vargas Pérez

ASESOR: 

Dr. Marín Pompa García

ASESOR: 

Dr. Dante Arturo Rodríguez Trejo

ASESOR: 

M. C. Javier Santillán Pérez

Chapingo, Texcoco, Estado de México, Diciembre del 2009

Análisis espacial de ocurrencia de incendios forestales en el estado de Durango

El jurado que revisó y aprobó el examen de grado de la **C. Diana Yemilet Avila Flores** autor de la presente tesis de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales estuvo constituido por:

DIRECTOR: 

M.C. Eduardo Vargas Pérez

ASESOR: 

Dr. Marín Pompa García

ASESOR: 

Dr. Dante Arturo Rodríguez Trejo

ASESOR: 

M. C. Javier Santillán Pérez

RESUMEN
Análisis espacial de ocurrencia de incendios forestales en el estado de Durango

Diana Yemilet Avila Flores

Diciembre de 2009

La descripción del patrón espacial de ocurrencia de los incendios forestales, es un aspecto importante a conocer para entender la dinámica del fuego dentro de los bosques. Por lo que el objetivo del presente trabajo fue determinar el patrón espacial de ocurrencia que siguen los incendios forestales dentro del Estado, así como la evaluación de los factores que mayor efecto tienen sobre su incidencia. Para determinar el patrón espacial, se utilizó el estadístico Índice de Moran, para medir la autocorrelación entre la ubicación de los incendios registrados en campo para un período de 5 años; los resultados muestran una elevada autocorrelación entre la ubicación espacial de los incendios forestales, donde el estadístico de Moran reúne en un 98.3 % la estructura global de asociación longitudinal y altitudinal. Para realizar la evaluación de las causas, se consideraron variables ambientales y sociales, las cuales fueron analizadas mediante la metodología de la Regresión Geográficamente Ponderada, bajo el modelo que utiliza el estimador de Mínimos Cuadrados Ordinarios, para datos espaciales. Los resultados del análisis indican un R^2 de 0.97, que muestra claramente la relación entre las variables consideradas. Así queda de manifiesto que factores como la vegetación, precipitación y mayormente las actividades antropogénicas relacionadas con el cambio de uso suelo, determinan el patrón espacial de ocurrencia de los incendios.

Palabras clave: Índice de Moran, Regresión GWR, fuego, uso de suelo

SUMMARY

The description of spatial pattern of occurrence of forest fires is an important aspect to understand the dynamics of fire in forests. The objective of this study was to determine the spatial pattern of forest fires in the state of Durango, Mexico, and the evaluation of the factors that have most effect on its incidence. To determine the spatial pattern, we used the statistic Moran index to measure the autocorrelation between the location of the fires in camp for a period of 5 years, the results show a high autocorrelation between the spatial location of forest fires, where Moran's statistic combines in 98.3% the overall structure of longitudinal and altitudinal association. To perform the evaluation of the causes were considered environmental and social variables, which were analyzed by the method of Geographically Weighted Regression, under the model using the Ordinary Least Squares estimator for spatial data analysis. Results indicated an $R^2 = 0.97$ which clearly shows the relationship between the variables considered. Thus factors such as vegetation, precipitation and anthropogenic activities mainly related to land use change, determine the spatial pattern of occurrence of fires.

Keywords: Moran's index, Regression GWR, fire, land use

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para realizar estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo y a la División de Ciencias Forestales por la oportunidad brindada para la realización de mis estudios de postgrado.

Al M.C. Eduardo Vargas Pérez, por la dirección del presente trabajo.

Al Dr. Marín Pompa García, por su gran apoyo y colaboración en el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Dante Arturo Rodríguez Trejo por su valiosa asesoría y contribución para la realización del presente.

Al M.C. Javier Santillán Pérez por su empeño en la revisión del presente trabajo.

A la Dra. Amparo Borja de la Rosa por el apoyo brindado y orientación durante la realización de mis estudios.

A mis compañeros y amigos de generación por ser parte esencial en este ciclo.

Al proyecto clave DGO-2008-CO1-87972, del fondo mixto Conacyt-Gobierno del Estado de Durango, por el apoyo para la realización del presente trabajo.

A TODOS MUCHAS GRACIAS

DEDICATORIA

A mi madre, Artemisa Flores Hernández y a mi abuela Alicia Hernández por el cariño, apoyo incondicional y confianza que me han brindado y sobre todo por creer siempre en mí.

A mis hermanos Israel y Alejandra por estar siempre a mi lado apoyando mis aspiraciones.

A mis sobrinos Julieta, Santiago y Amanda

Al Dr. Marín Pompa García por ayudarme a encontrar el rumbo y camino correcto cuando creía que lo había perdido.

Gracias

CONTENIDO

RESUMEN	i
SUMMARY	ii
ÍNDICE DE CUADROS Y FIGURAS.....	3
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL	4
1.1 Justificación.....	5
1.2 Objetivos	5
1.2.1 General.....	5
1.2.2 Específicos	5
1.3 Hipótesis	5
CAPÍTULO II. ANÁLISIS ESPACIAL DE LA OCURRENCIA DE INCENDIOS FORESTALES EN EL ESTADO DE DURANGO.....	6
2.1 Resumen	6
Summary	7
2.2 Introducción.....	8
2.3 Materiales y Métodos	10
2.3.1 Descripción del área de estudio.....	10
2.3.2 Base de datos.....	11
2.3.3 Análisis espacial	12
2.4 Resultados	14
2.5 Discusión	16
2.6 Conclusiones	18
2.7 Literatura citada	19
CAPÍTULO III. EVALUACIÓN GEOESPACIAL DE FACTORES QUE INCIDEN EN LA OCURRENCIA DE INCENDIOS FORESTALES EN EL ESTADO DE DURANGO.	21
3.1 Resumen	21
Summary	22
3.2 Introducción.....	23
3.3 Materiales y Métodos	25
3.3.1 Descripción del área de estudio.....	25
3.3.2 Metodología	27
3.4 Resultados	30
3.5 Discusión	35

3.6 Conclusiones	37
3.7 Literatura citada	38
IV. DISCUSIÓN GENERAL.....	40
V. CONCLUSIONES GENERALES.....	42
VI. LITERATURA CITADA.....	43

ÍNDICE DE CUADROS Y FIGURAS

CAPÍTULO II. ANÁLISIS ESPACIAL DE LA OCURRENCIA DE INCENDIOS FORESTALES EN EL ESTADO DE DURANGO.....	8
Figura 1. Localización del área de estudio	13
Figura 2. Criterios de vecindad	15
Figura 3. Diagrama de dispersión de Moran para variables bajo estudio	17
CAPÍTULO III. EVALUACIÓN GEOESPACIAL DE FACTORES QUE INCIDEN EN LA OCURRENCIA DE INCENDIOS FORESTALES EN EL ESTADO DE DURANGO.	24
Figura 1. Localización del área de estudio.	29
Figura. 2. Proceso para encontrar variables clave.....	34
Cuadro 1. Variables más significativas.....	34
Cuadro 2. Diagnostico del OLS.....	35
Figura 3. Resultados diagnostico OLS.....	35
Figura 4. Distribución de residuales.....	37

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL

El fuego desempeña un importante papel como parte de los procesos de los ecosistemas forestales. De igual manera, en forma controlada, sirve como herramienta agrícola necesaria para preparar el terreno para nuevas siembras o renovar los pastos, pero de forma incontrolada, puede considerarse como incendio que transforma o destruye; el fuego ha tenido o tiene relación con la mayor parte de zonas de vegetación de la tierra (Arnaldos *et al.* 2004). Por otra parte, el excesivo uso del fuego por el hombre, ha derivado en la degradación de diversos ecosistemas forestales. La ocurrencia de incendios forestales y su potencial de destrucción, así como la dificultad para controlarlos y extinguirlos, tiene relación directa con la existencia y particularidades de una serie de factores de riesgo y de peligro (CONAFOR 2008). El peligro se refiere a la existencia tanto de condiciones ambientales como de los combustibles, favorables para el inicio y desarrollo de un incendio. El riesgo corresponde a la existencia de factores que pueden iniciar fuego en el bosque como un rayo o las quemas realizadas por los agricultores (Rodríguez 1996). Dentro de las causas que originan los incendios, aquellas relacionadas de una u otra forma con la intervención humana sobre el medio son más destacadas en relación con aquellas de origen natural.

1.1 Justificación

Los estudios realizados en el estado de Durango relacionados con la ocurrencia de incendios, se han centrado básicamente en análisis de diversos factores ambientales que determinan su presencia restándoles sustento estadístico a la influencia antropogénica, la cual debe considerarse un factor de relevancia para el diseño de estrategias para el manejo integral del fuego dentro del estado.

1.2 Objetivos

1.2.1 General

Realizar un análisis espacial de la ocurrencia de incendios forestales y la evaluación de los factores ambientales y antropogénicos en el estado de Durango.

1.2.2 Específicos

Determinar la conducta del patrón espacial de ocurrencia de los incendios forestales.

Evaluar los factores de mayor incidencia asociados a la presencia espacial de los incendios.

1.3 Hipótesis

Los incendios forestales en el estado de Durango tienden a presentar un patrón espacial de ocurrencia, influenciado por la asociación de diversos factores ambientales, pero principalmente por los derivados de la actividad antropogénica.

CAPÍTULO II. ANÁLISIS ESPACIAL DE LA OCURRENCIA DE INCENDIOS FORESTALES EN EL ESTADO DE DURANGO

Diana Yemilet Avila Flores¹, Marín Pompa –García², Eduardo Vargas-Pérez³

1, División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, diesel_dyaf@hotmail.com, 2, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango, mpgarcia@ujed.mx, 3, División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, lalo.vargas@gmail.com

2.1 Resumen

Se estudio el patrón de dispersión espacial de los incendios forestales para el estado de Durango, teniendo como hipótesis un patrón espacial no aleatorio. Se usaron los reportes semanales de incendios de CONAFOR para un periodo de cinco años, analizados mediante el coeficiente de Moran. Se incluyó un análisis gráfico mediante el diagrama de dispersión y el indicador local de asociación espacial. Los resultados muestran una elevada autocorrelación entre la ubicación espacial de los incendios forestales, donde el estadístico de Moran reúne en un 98.3 % la estructura global de asociación longitudinal y altitudinal.

Palabras clave. Autocorrelación, Índice de Moran, incendio.

Summary

There was studied the pattern of spatial dispersion of the forest fires for the state of Durango, taking as hypothesis the pattern at random. Used were the weekly reports of fires from the CONAFOR for a period of 5 years, analyzing by means of the Moran coefficient. A graphic analysis is included by means of the diagram of dispersion and the local indicator of spatial association. The results show a high auto correlation between the spatial location of forest fires, where the statistic of Moran assembles in 98.3 % the global structure of longitudinal affiliation and attitudinal.

Key words: Autocorrelation, Moran's Index, Fire.

2.2 Introducción

El fuego, al igual que otros disturbios naturales, es un factor que se encuentra presente de manera natural en muchos ecosistemas y paisajes a lo largo del mundo (Whelan 1995) y su presencia es vital en muchos ecosistemas. Los incendios forestales generan diversos impactos negativos ecológicos y económicos, así como amenazas para combatientes y personas que viven en o cerca del bosque. Sin embargo también cumplen un papel ecológico o evolutivo en diversos ecosistemas forestales (Espinoza *et al.* 2008).

El fuego puede tener una influencia positiva en la naturaleza, ya que ayuda a mantener la biodiversidad, pero cuando se utiliza de manera irresponsable o se produce por alguna negligencia, puede convertirse en un incendio de consecuencias devastadoras para el ambiente, constituyéndose como factor importante de la degradación de los ecosistemas (CONAFOR 2007).

El fenómeno de los incendios forestales tiene una clara manifestación territorial, ya que tanto los factores como los efectos se distribuyen en el espacio y son afectados por él (Chuvieco *et al.* 1998); por lo que con la aplicación de métodos cuantitativos de análisis espacial se tiene la oportunidad de la detección y descripción de patrones de distribución, permitiendo evaluar hipótesis sobre si el fenómeno observado sigue una distribución territorial aleatoria o correlacionada, ya sea aglomerada o dispersa; siendo esto un concepto básico de la estadística espacial vinculada con la geografía, por lo cual Tobler (1970) postuló la “primera ley de la geografía” en la que se afirma que en el análisis geográfico todo está

relacionado con todo, pero las cosas cercanas están más relacionadas entre sí que las cosas lejanas. Entre las aplicaciones más usuales de los sistemas de información geográfica se encuentra el análisis espacial, el cual constituye una serie de técnicas estadísticas y matemáticas aplicadas al estudio de los datos distribuidos sobre el espacio geográfico, posibilitando trabajar con las relaciones espaciales de las entidades contenidas en cada capa temática de la base de datos (Buzai y Baxendale 2006). La utilización de estos métodos se han desarrollado principalmente en el ámbito social para conocer las tendencias demográficas, desarrollo económico regional (Vilalta 2003), comportamiento electoral (Vilalta 2004) y recientemente en patrones de la pérdida de vegetación en ecosistemas áridos (Pompa 2008). En el ámbito de los incendios forestales este tipo de análisis permite extraer conclusiones acerca del grado de actividad de cada uno de las variables que en él intervienen (Lee *et al.* 2006; Verdú 2007).

En el Estado de Durango se registraron para el año 2008, 138 incendios asociados a diferentes causas afectando una superficie total de 27,691 ha, que lo ubicaron como el estado con mayor superficie afectada (CONAFOR 2008). Por lo que, se considera conveniente efectuar un aporte al conocimiento de estos fenómenos en el Estado, realizando un estudio de los patrones de distribución de los incendios que proporcione un punto de referencia para un análisis posterior de la interpretación de los factores que más influyen en su incidencia, por lo que el objetivo del presente fue conocer el patrón espacial que sigue la ocurrencia de los incendios forestales en el Estado, teniendo como hipótesis que este fenómeno sigue un patrón espacial no aleatorio.

2.3 Materiales y Métodos

2.3.1 Descripción del área de estudio

El Estado de Durango se encuentra ubicado en la región centro-noroccidental de México, tiene frontera al norte con Chihuahua, al noroeste con Coahuila, al sureste con Zacatecas, al sur con Nayarit y al oeste con Sinaloa. Sus coordenadas extremas son 26°53' y 22°16' latitud Norte y 102°29' 107°16' longitud Este (INEGI 2000); Este es atravesado por el Trópico de Cáncer 23°16'18" N en su parte sur en los municipios El Mezquital y Pueblo Nuevo, de tal manera que la mayor parte de su superficie se localiza en la zona subtropical (Figura 1). El Estado de cuenta con una superficie forestal de más de 9 millones de hectáreas (PROFEPA 2009) con diversidad en cuanto a las comunidades forestales, existiendo vegetación propia de clima semiárido y árido, de clima templado y subtropical. Los bosques templados son de gran importancia ecológica y de explotación forestal, formados principalmente por varias especies de pino y encino.

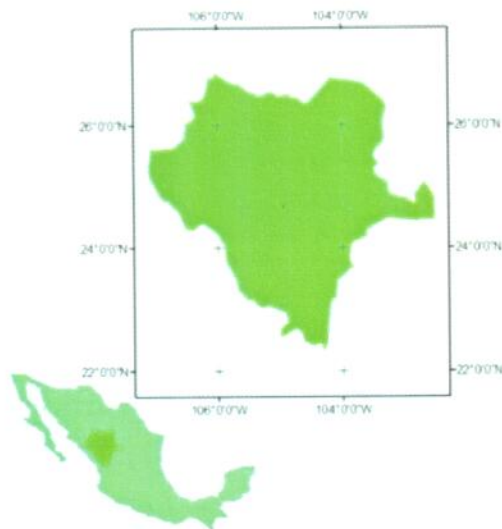


Figura 1. Localización del área de estudio.

2.3.2 Base de datos

Se dispuso de los reportes semanales de incendios forestales de la Comisión Nacional Forestal registrados en el Estado para un periodo de 5 años (2004-2008), tomando datos como las coordenadas, que sirvieron para ubicar geográficamente la localización de los incendios para el período de estudio.

2.3.3 Análisis espacial

La autocorrelación puede definirse como la concentración o dispersión de los valores de una variable en un mapa; es decir, refleja el grado en que objetos o actividades en una unidad geográfica son similares a otros objetos o actividades en unidades geográficas próximas (Goodchild 1987).

Para detectar y medir la autocorrelación espacial de las superficies con registro de incendio, se utilizó el coeficiente de Morán (1950), cuyos valores varían entre +1 y -1, donde +1 indica una correlación positiva perfecta o perfecta concentración y -1 indica una correlación negativa perfecta o perfecta dispersión y el 0 indica un patrón espacial totalmente aleatorio:

$$I = \frac{N \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (1)$$

Donde X_i hasta X_j son los valores que toma la variable X en los puntos i y j , N es el número de datos, y W_{ij} es el peso de la clase de distancia d , que puede valer $W_{ij} = 1$ si el punto j está dentro de la clase de distancia d medida a partir del punto i , o $W_{ij} = 0$ si no se cumple dicha condición (Sokal y Oden 1978):

$$W_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } d_{ij} \leq d \\ 0 & \text{si } d_{ij} > d \end{cases} \quad (2)$$

En el cociente de (1), el numerador es un término que muestra la covarianza mientras que el denominador indica la varianza, lo que hace un diseño similar al coeficiente de correlación de Pearson (1896). Sin embargo en el primero la asociación de valores del conjunto de datos es determinado por una matriz de distancias (2) o contigüidad que predefine a los valores vecinos (los valores para el cómputo del coeficiente). En otras palabras, los pesos W_{ij} deciden la proximidad de cada punto analizado.

Debido a que el índice proporciona la medida de la correlación entre los valores vecinos en un patrón, la vecindad entre las unidades espaciales se determinará empleando el criterio “Reyna”, por su proximidad de contacto en todos los sentidos (un máximo de 8 vecinos). Para el procesamiento se utilizará el programa GEODA desarrollado por Anselin (2003).

			
Criterio lineal	Criterio torre	Criterio alfil	Criterio reyna

Figura 2. Criterios de vecindad

Como instrumento gráfico de análisis de la autocorrelación espacial, se utilizó el diagrama de dispersión de Moran, en el cual se estandariza la variable a analizar y se obtiene el retardo espacial de dicha variable, representándose ambos valores en un eje cartesiano.

La pendiente de la recta de regresión es el valor del estadístico de Moran de autocorrelación espacial global, de forma que cuanto mayor sea el ángulo que forme ésta con el eje de abscisas, más fuerte será el grado de autocorrelación espacial y viceversa (Anselin 2003).

Complementariamente se utilizó el indicador local de asociación espacial LISA (Local Indicator of Spatial Association), cuyo objetivo es que el estadístico obtenido para cada sección suministre información acerca de la relevancia de valores similares alrededor de la misma.

2.4 Resultados

La dependencia o autocorrelación espacial surge siempre que el valor de una variable en un lugar del espacio está relacionado con su valor en otro u otros lugares del espacio (Moreno y Vayá 2001).

Así en la Figura 3 los indicadores de autocorrelación muestran que, para la variable longitud y latitud existe una elevada autocorrelación positiva con valores de 0.9834 y 0.9832 respectivamente, es decir, el estadístico de Moran reúne en un 98.34% y 98.32 % la estructura global de asociación longitudinal y altitudinal entre las unidades con incendios (Figura 3 (A) y (D)).

Así mismo se puede observar que el valor significativo positivo informa de la presencia de un esquema de autocorrelación espacial positiva, lo que indica, la presencia de una concentración de valores similares de la variable analizada en unidades vecinas (Figura 3 (B) y (E)).

La autocorrelación positiva que muestran estas variables es estadísticamente significativa, lo que indica una tendencia a la concentración de las áreas con incendios registrados, por lo que puede afirmarse con un nivel de confianza del 99%, que la concentración no es aleatoria (Figura 3 (C) y (F)).

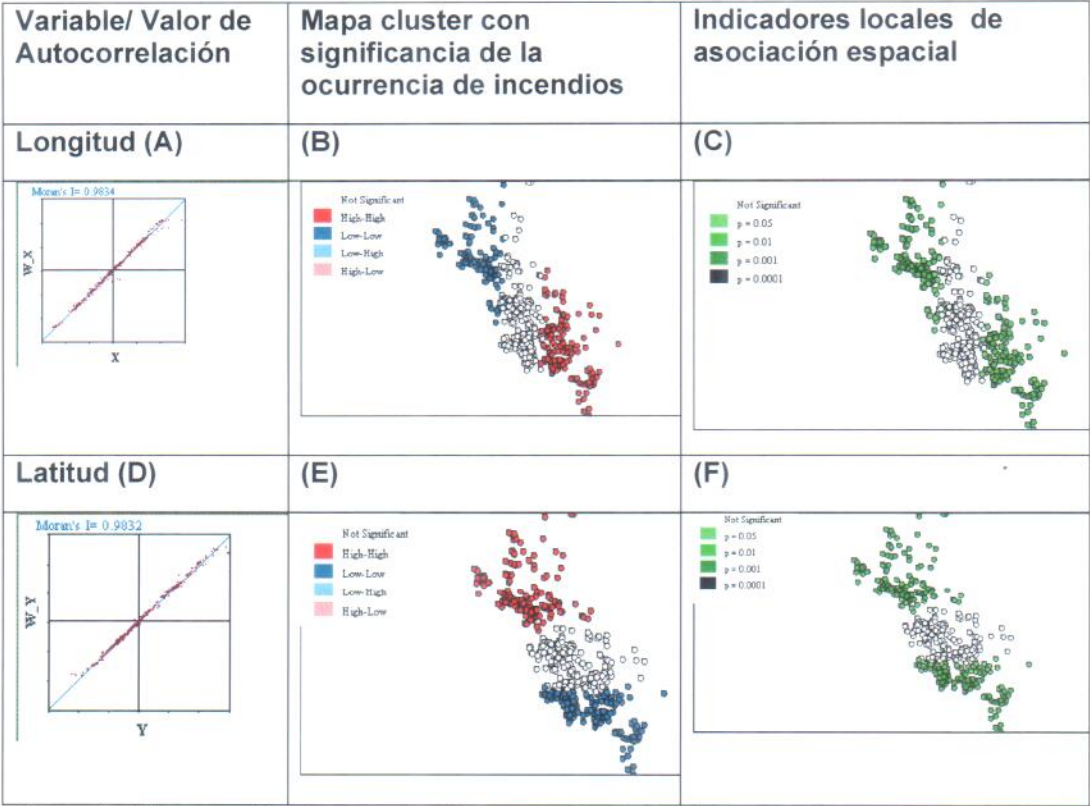


Figura 3. Diagrama de dispersión de Moran para variables bajo estudio

Los resultados muestran la tendencia a la concentración de los incendios forestales en el Estado, presentándose en su mayoría en la zona boscosa debido a la carga de combustibles entre otras causas relacionadas con la actividad antropogénica.

Al utilizar el mapa de la significación de los indicadores locales asociado al diagrama de dispersión de Moran (Figura 3 (B) y (E)), podemos identificar zonas con numerosas áreas con un alto grado de presencia de incendios, rodeadas de zonas con presencia también alta (situación *High-High* en el gráfico de Moran). Así mismo, se identifican zonas con presencia baja rodeadas de unidades también con presencia baja (situación *Low-Low*), o bien zonas de presencia baja rodeadas de unidades con presencia alta de la variable analizada (situación *Low-High*), o zonas con presencia alta rodeadas por zonas con presencia baja (situación *High-Low*),. Por último, también se pueden detectar zonas sin asociación espacial significativa las cuales aparecen en blanco.

2.5 Discusión

Los resultados anteriores permiten mostrar que el fenómeno de los incendios tiene una clara manifestación territorial dentro del área de estudio, derivado de la similitud entre factores dentro del área, lo que concuerda con Tobler (1970) y también es coincidente con Chuvieco *et al.* (1998) quien menciona que el estudio de los incendios forestales, en la mayoría de los casos requiere un análisis integrado del territorio, ya que un incendio forestal no se genera por la acción de un factor aislado, sino que se deriva de la acción conjunta de un grupo de factores entre los cuales, la vegetación, los tipos climáticos, topografía y actividades humanas resultan especialmente significativas.

Estos hallazgos han resultado un aporte estadísticamente sólido, ya que según Chuvieco *et al.* (1998) se han realizado algunos estudios de distribución espacial de la ocurrencia de incendios forestales (Gordi *et al.*

1996; Lourenço y Gonçalves 1990), de los cuales muestran el gran interés para relacionar los incendios con factores espaciales. Sin embargo, menciona que las fuentes estadísticas utilizadas son bastante limitadas.

Han-Bin *et al.* (2006) realizaron un análisis espacial y temporal del patrón de incendios en Corea utilizando la función K de Ripley donde al igual que en nuestro análisis los resultados muestran la tendencia hacia la concentración de incendios, los autores atribuyen esta tendencia a las causas del incendio. Sin embargo, la función K de Ripley supone un espacio homogéneo considerando todos los puntos igualmente equivalentes, lo que hace difícil su aplicación en la topografía real. Una alternativa para resolver este problema sería usar una función K generalizada, usada en un espacio no homogéneo y verificarlo mediante una mapa de probabilidad de incendio.

Estas ideas permiten derivar otras interrogantes, en el sentido de evaluar la intensidad de la concentración de incendios a partir de diversas variables. Rodríguez *et al.* (2008) con el propósito de detectar las variables que se correlacionan con las indicativas de siniestralidad de incendios determinaron una correlación entre seis variables de siniestralidad y 86 variables explicatorias de incendios, se incluyeron todos los estados del país y mediante un proceso de regresión de inclusión/eliminación progresiva de variables mediante el procedimiento Stepwise del programa SAS.

Encontrando que las variables superficie de área perturbada, la velocidad más alta de las máximas de viento, el número de productores agrícolas apoyados durante el ciclo productivo primavera verano, el número de combatientes de incendios forestales y el nivel de alfabetización, fueron las

variables con una mayor correlación con la superficie afectada, el número de incendios y otros indicadores de siniestralidad.

El análisis espacial, es una técnica que ha sido poco utilizada en la investigación del fenómeno de los incendios forestales.

Sin embargo, con los resultados obtenidos en el presente trabajo se aprecia que esta técnica permite focalizar la presencia de los incendios, dando así pauta para su posterior caracterización, al permitir conocer la conjugación de factores que más peso tienen en la presencia de dicho fenómeno, que se plantea la necesidad de explicar estadísticamente la asociación espacial que presentan dichos factores.

2.6 Conclusiones

La existencia de asociación espacial puesta de manifiesto por las técnicas utilizadas en la variable bajo estudio confirma nuestra hipótesis y aporta un nuevo matiz de las asociaciones entre los puntos de incendios, indicando dónde se presenta la concentración más significativa sobre los cuales los planificadores y los investigadores pueden enfocar su trabajo.

Estas interacciones plantean la necesidad de explicar estadísticamente este fenómeno a través de algún método de regresión específico, que permita encontrar aquellas variables explicativas de la asociación encontrada, ya que por ahora sólo se determinó el grado de autocorrelación existente, lo que conducirá a establecer una mayor interrelación entre patrones y procesos de conjugación de los factores en la búsqueda de una mejor explicación del fenómeno de los incendios.

2.7 Literatura citada

- Anselin, L. 2003. GeoDa 0.9 User's Guide. Spatial Analysis Laboratory, University of Illinois, Urbana-Champaign, IL
- Buzai, G.D.; C.A. Baxendale. 2006. Análisis socioespacial con Sistemas de Información Geográfica. Lugar Editorial. Buenos Aires.
- CONAFOR (Comisión Forestal Nacional). 2008. Reportes semanales de incendios forestales. Página electrónica <http://www.conafor.gob.mx>
- CONAFOR (Comisión Forestal Nacional). 2007. Documento didáctico para el curso Introducción a las Quemas Prescritas. Elaborado por The Nature Conservancy y la Comisión Nacional Forestal. México. 58 pp.
- Chuvieco E., M. P. Martín, J. Martínez y F. J. Salas. 1998. Geografía e Incendios Forestales. Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá. Serie Geográfica. Vol. 7 1998. 11-17 pp. Alcalá de Henares, Madrid.
- Espinoza-Martínez, L.A., D. A. Rodríguez T y F. J. Zamudio-Sánchez. 2008. Sínecológia del sotobosque de *Pinus hartwegii* dos y tres años después de quemas prescritas. Agrociencia 42:717-730.
- Goodchild, M. 1987. Spatial analytical perspective on geographical information systems. International Journal of geographical information systems, 1:327-334.
- Gordi, J., J. Pintó y J. Vila. 1996. L'estudi deis incendis en el vaéa mediterran Documeros d'AnMisi Geográfica 28: 135-151
- Han- Bin, K., W.K. Lee, M. S. Won, K.S. Koo, M. B. Lee and S. C. Lee. 2007. Spatial and temporal pattern of the huma-caused forest fire occurrences in Korea. Korea University, Seoul, Korea, Department of Forest environment, Korea Forest Research Institute.
- INEGI 2000. Página electrónica del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México. <http://www.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/dgo.htm>
- Lee, L.B., Holden, Z. A. Smith and M.J. Falkowski. 2006. Remote sensing techniques to assess active fire effects. International Journal of Wildland fire 15:319-345.
- Lourenço, O.L. and A.B. Gonçalves. 1990. Cartography of forest fires recorded In Central Portugal from 1983 to 1989. M Corrf. Forest Fire Research. Coimbra, Portugal: A (08):1-16.
- Morán, P. 1950. Notes on continuos stochastic phenomena. Biométrica, 37: 17-23.

Moreno, R. y E. Vayá Valcarce. 2001. Técnicas econométricas para el tratamiento de datos espaciales: la econometría espacial. Universidad de Barcelona. 156 pp.

Pearson K. 1896. Mathematical contributions to the theory of evolution: III. Regression, heredity, and panmixia. Philosophical Transactions of the Royal Society 187: 253-318.

Pompa-G, M. 2008. Distribución espacial de la pérdida de vegetación en ecosistemas áridos de México. MES 3 (3):13-22.

PROFEPA (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente) 2009. Estado de Durango Recursos Naturales. Página electrónica <http://www.profepa.gob.mx/PROFEPA/DelegacionesPROFEPA/Durango/RecursosNaturales/INSPECCION+FORESTAL.htm>

Rodríguez T., D. A., H. Ramírez M, H. Tchikoué Y J. Santillán P. 2008. Factores que inciden en la siniestralidad de los incendios forestales. Ciencia Forestal en México 33 (104):38-57.

Sokal, R.R. y N.L. Oden. 1978. "Spatial autocorrelation in biology 1. Methodology", Biological Journal of the Linnean Society, 1978, 190-199.

Tobler, W. R. 1970. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. Economic Geography, 46: 234-240.

Vilalta, C. J. 2004. Sobre la especialidad de los procesos electorales y una comparación entre las técnicas de regresión OLS y SAM. Working paper, EGAP- Tecnológico de Monterrey, Campus Ciudad de México. Disponible en: Michel Sawada, Universidad de Ottawa, http://www.uottawa.ca/academic/arts/geographie/ipcweb/newlook/members/old_members7sawada.htm.

Vilalta C.J. 2003. Una aplicación del análisis espacial al estudio de las diferencias regionales del ingreso en México. Economía, sociedad y territorio, 4(14): 317-340.

Verdú, F. 2007. Análisis espacial de área quemada: patrón y variación de los incendios forestales en España, 1991-2005. tesina. Departamento de geografía. Universidad de Alcalá. Alcalá de Henares.

Whelan. R.J. 1995. The ecology of fire. Cambridge University Press. Cambridge. 346 pp.

CAPÍTULO III. EVALUACIÓN GEOESPACIAL DE FACTORES QUE INCIDEN EN LA OCURRENCIA DE INCENDIOS FORESTALES EN EL ESTADO DE DURANGO.

¹ Diana Yemilet Avila Flores, ² Eduardo Vargas Pérez, ³Marín Pompa-García, ⁴ Dante Arturo Rodríguez Trejo, ⁵ Javier Santillán Pérez

¹, División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, diesel_dyaf@hotmail.com, ², División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, lalo.vargas@gmail.com ³, Facultad de Ciencias Forestales, UJED, mpgarcia@ujed.mx, ⁴, División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, dantearturo@yahoo.com, ⁵, División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, santillan850@hotmail.com.

3.1 Resumen

Los incendios forestales ocasionan grandes afectaciones a los ecosistemas del planeta. Estudiar las causas que los originan es de suma importancia, particularmente cuando se identifica cada una de ellas y se determina el grado de su contribución específica como variable explicativa en la ocurrencia de estos siniestros. El objetivo del presente estudio fue encontrar las variables que mayormente inciden en la ocurrencia de incendios según su patrón espacial dentro del estado de Durango. El análisis se realizó a partir de datos de incendios forestales obtenidos en campo para un periodo de 5 años, los cuales resultaron altamente correlacionados, por lo que se aplicó regresión geográficamente ponderada, bajo el estimador de mínimos cuadrados ordinarios. Los resultados muestran que el patrón espacial de los incendios en el área de estudio está predominantemente determinado por la influencia antropogénica en la intensidad de cambio de uso de suelo como mayor variable explicativa, además de la vegetación y precipitación. Las bondades de ajuste se reflejan en un R^2 de 0.97 y un AIC de 757.28, el cual indica que el modelo ajustado muestra claramente la relación entre las variables consideradas. De esta manera queda de manifiesto que la ocurrencia de los incendios se da por la conjunción de diversos factores ambientales, pero cuando se conjugan con la influencia humana su aportación es muy significativa dentro del modelo estimado.

Palabras clave: patrón espacial, regresión GWR, uso de suelo

Summary

Forest fires cause great damages to the planet's ecosystems. To study the underlying causes is crucial, particularly when it identifies each and determining the degree of its specific contribution as an explanatory variable in the occurrence of these incidents. The aim of this study was to find the variables that mostly affect the occurrence of fires according to its spatial pattern within the state of Durango. The analysis was made from data obtained in field forest fires for a period of 5 years, which were highly correlated, so geographically weighted regression was applied under the ordinary least squares estimator. The results show that the spatial pattern of fires in the study area is predominantly determined by the anthropogenic influence on the intensity of land use change as a major explanatory variable in addition to the vegetation and precipitation. The goodness of fit is reflected in an R^2 of 0.97 and an AIC of 757.28 which indicates that the fitted model clearly shows the relationship between the variables considered. Thus it appears that the occurrence of fires is given by the combination of environmental factors, but when combined with human influence their contribution is very significant in the estimated model.

Keywords: spatial pattern, GWR regression, land use

3.2 Introducción

El patrón espacial de la ocurrencia de los incendios forestales es un aspecto importante en el estudio de la dinámica del fuego en el bosque. Existen muchos factores bióticos y abióticos que determinan la ocurrencia de un incendio sin embargo los efectos de estos factores puede variar entre ecosistemas y a través de escalas temporales y espaciales (Yang 2007). La presión antropogénica ejerce una gran influencia en la frecuencia y patrón espacial de los incendios siendo a menudo la carga de combustibles el único factor considerado en la planificación de las actividades de gestión para reducir el riesgo y peligro de incendio. La comprensión tanto de las características antropogénicas y biofísicas que explican cómo varían los patrones de incendios debe ayudar a determinar donde es más probable que estos se presenten (Syphard *et al.* 2008).

Así queda de manifiesto, que para la formulación de estrategias y acciones para el manejo del fuego, es indispensable contar con información confiable sobre la naturaleza de los incendios forestales, particularmente en lo que respecta a las condiciones que favorecen la ocurrencia y a los agentes de causalidad. En este contexto resulta de gran importancia el estudio de la causalidad dada la inevitable necesidad de disponer de antecedentes suficientes para fundamentar el diseño e implementación de programas de prevención basados en la sensibilización de los agentes de riesgo (Castillo *et al.* 2002).

Varios son los trabajos que se han desarrollado en este sentido, entre los que se pueden mencionar el de Martínez (2004) quien encontró que la incidencia de incendios en España se debe a las quemas negligentes e intencionales, ambas relacionadas, con la actividad agropecuaria, las cuales explican del 20 al 50% de los incendios en España.

Rodríguez *et al.* (2008) destacan para México que la conjugación de diversos factores como velocidad máxima del viento, número de productores, el nivel de alfabetización entre otros son los que más se asocian con la incidencia de incendios. Roman y Martínez (2006) encontraron que la alta incidencia de incendios en Reservas de la Biosfera del estado de Chiapas se relacionaba con la alta densidad de caminos y las extensiones de las tierras agrícolas.

En esta línea también se han desarrollado algunos trabajos para el estado de Durango, como lo son el de Drury y Veblen (2008) quienes estudiaron el patrón espacial de ocurrencia de incendios en la reserva forestal Las Bayas, el cual fue analizado en relación a la variabilidad del clima, topografía y el uso de la tierra; tales autores encontraron que la presencia de incendios se relacionaba con los años de clima extremo y el de Rentería (2004) quien desarrolló modelos de peligrosidad de incendios, como una herramienta de apoyo para la toma de decisiones en la elaboración del plan de manejo de combustibles forestales para el ejido Pueblo Nuevo.

En un primer estudio, Avila *et al.* (2009) se analizó el patrón espacial que sigue la ocurrencia de incendios para el estado de Durango, cuyo resultado mostró que sigue un patrón autocorrelacionado y que la tendencia de

concentración se presenta principalmente en la zona boscosa; quedando pendiente en dicho estudio encontrar las variables explicativas de tal autocorrelación. Sin embargo, poco se ha explicado la relación entre factores causales antropogénicos y la geografía de los ecosistemas debido a la alta diversidad que se presenta dentro del estado Durango, en la cual todos los tipos de vegetación de México están presentes a excepción de la selva alta, dicha diversidad está dada por su compleja fisiografía la cual tiene su eje en la Sierra Madre Occidental ya que más de la mitad del estado se ubica sobre esta (González *et al.* 2007).

Es por ello, que el objetivo del presente trabajo es encontrar las variables explicativas del patrón espacial que sigue la ocurrencia de los incendios forestales en el estado de Durango, teniendo como hipótesis que dicho patrón está fundamentado por las actividades antropogénicas en las áreas donde se presentan los incendios.

3.3 Materiales y Métodos

3.3.1 Descripción del área de estudio

El Estado de Durango se encuentra ubicado en la región centro-noroccidental de México, tiene frontera al norte con Chihuahua, al noroeste con Coahuila, al sureste con Zacatecas, al sur con Nayarit y al oeste con Sinaloa.

Sus coordenadas extremas son 26°53' y 22°16' latitud Norte y 102°29' 107°16' longitud Este (INEGI 2000); Este es atravesado por el Trópico de Cáncer 23°16'18" N en su parte sur en los municipios El Mezquital y Pueblo Nuevo, de tal manera que la mayor parte de su superficie se localiza en la

zona subtropical (Figura 1). El Estado de cuenta con una superficie forestal de más de 9 millones de hectáreas (PROFEPA 2009) con diversidad en cuanto a las comunidades forestales, existiendo vegetación propia de clima semiárido y árido, de clima templado y subtropical. Los bosques templados son de gran importancia ecológica y de explotación forestal, formados principalmente por varias especies de pino y encino.

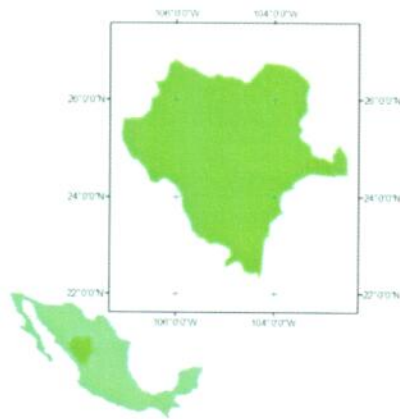


Figura 1. Localización del área de estudio.

3.3.2 Metodología

3.3.2.1 Datos

Los datos utilizados para el desarrollo de este trabajo se tomaron de los resultados de la Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana escala 1:250000 (2001-2002), realizada por la Secretaria de Recursos Naturales y Medio Ambiente y el Colegio de Posgraduados (2002), los cuales fueron considerados en sus dos modalidades.

Una base de datos que se elaboró a partir de formatos de datos de campo y la otra, es la cartográfica a escala 1:250,000 en formato digital. La información cartográfica consta de un mapa fisiográfico, sobre el que se generaron 16,040 unidades homogéneas denominadas Sistemas Terrestres. Para cada una de las unidades cartográficas delimitadas sobre los espaciomapas, fue registrada la información para integrar la base de datos, la cual incluyó para cada unidad cartográfica su identificación a través de un número, su localización geográfica y caracterización de campo, donde incluyeron la forma del terreno, el tipo de roca, el uso actual del suelo, la vegetación dominante y la influencia humana en el cambio del uso del suelo; además, se indica información climática que considera la temperatura media anual (en °C) y a la precipitación total anual (en mm).

Para este estudio se tomó como base la capa de información correspondiente a las unidades cartográficas delimitadas para el estado de Durango, sobre la cual se sobrepuso la capa de incendios forestales registrados para el estado, tomados en campo por la CONAFOR para el periodo 2004-2008.

Se unieron las bases de datos que acompañan a cada capa de información para generar una sola base de datos, la cual quedó integrada de tal manera que las hileras constituyeron a las unidades cartográficas y las columnas a cada una de sus características, donde además se incluyó un campo indicando el número de incendios por unidad. La caracterización de campo tomada para este estudio solo incluyó Intensidad antropogénica en el cambio de uso de suelo, vegetación dominante, temperatura, precipitación y pendiente.

3.3.2.2 Análisis estadístico

Para realizar el análisis estadístico y encontrar las variables explicativas más significativas que describen el patrón espacial de ocurrencia de incendios, en este estudio solo se consideró conveniente utilizar como variables a la temperatura, precipitación, vegetación e intensidad antropogénica en el cambio de uso de suelo, para sustentar dicha elección se consultó bibliografía relacionada con la descripción de patrones espaciales de incendios entre los cuales se pueden mencionar los siguientes, Han- Bin *et al.* (2008), Syphard *et al.* (2008) Yang *et al.* (2007), Dong *et al.* (2006), Krishna *et al.* (2006), quienes analizaron los patrones espaciales de incendios utilizando factores físicos, ambientales y sociales y coincidiendo en sus resultados que los factores que más influyen dicho patrón son los factores sociales destacando entre estos las actividades relacionadas con el uso del suelo y a la conjugación de factores ambientales como el clima y topográficos que en su momento predisponen a la ignición.

Se realizó un análisis de regresión para datos espaciales mediante la metodología de la Regresión Geográficamente Ponderada (GWR). La idea fundamental de esta técnica es que los parámetros se pueden calcular dada una variable dependiente y un conjunto de una o más variables independientes, cuyos valores han sido medidos en lugares donde su ubicación es conocida. Si consideramos la primera ley geográfica de Tobler (1970) la cual enuncia que todo está relacionado con todo lo demás, pero que las cosas cercanas están más relacionadas que las cosas distantes, si queremos estimar los parámetros para un modelo en algún lugar u , las observaciones que están más cerca a la ubicación del lugar u deben tener un mayor peso en la estimación de las observaciones que están más lejos (Charlton y Fotheringham 2009).

Técnicamente, esta regresión utiliza la información proveniente de todos los puntos que están alrededor de un punto de análisis, atribuyendo más peso a los datos próximos al punto y menos a los alejados.

La ecuación que utiliza esta técnica utilizando el estimador OLS (Mínimos Cuadrados Ordinarios) es la siguiente:

$$y_i(u) = \beta_{0i}(u) + \beta_{1i}(u)x_{1i} + \beta_{2i}(u)x_{2i} + \dots + \beta_{mi}(u)x_{mi}$$

Donde la notación $\beta_{0i}(u)$ indica que el parámetro que describe la relación alrededor de la ubicación u es específica de ese lugar. Una predicción puede ser hecha para la variable dependiente, si las mediciones de las variables independientes también están disponibles en el lugar de u .

Se consideró el número de incendios por unidad cartográfica como la variable dependiente y las variables independientes fueron las características descriptivas de cada unidad: Intensidad de efectos antropogénicos en el cambio de uso de suelo, (definida por el tipo de causa, tasa y extensión del deterioro del sistema terrestre), vegetación dominante, temperatura, precipitación y pendiente; la regresión fue realizada en Arcgis® versión 9.3.

3.4 Resultados

En primera instancia los resultados del proceso para encontrar las variables clave, indican que las variables más significativas fueron Intensidad antropogénica en el cambio de uso de suelo, precipitación y vegetación dominante, ya que mostraron mayor relación (Figura 2).

Los resultados del modelo global de regresión (OLS) indican que las variables sometidas al análisis son estadísticamente significativas, esto mostrado a través de los signos del coeficiente del modelo de regresión (+) además de su magnitud (*) que indican dicha significancia estadística; además los valores más bajos de la probabilidad indican a las variables que mejor explican la relación entre las variables utilizadas en el modelo.

Esto es, la intensidad de efectos antropogénicos en el cambio de uso de suelo y el tipo de vegetación dominante son las que explican mejor el patrón espacial de ocurrencia, también se observan valores bajos de VIF (>7.5), lo cual muestra que no existe multicolinealidad entre las variables (Cuadro 1).

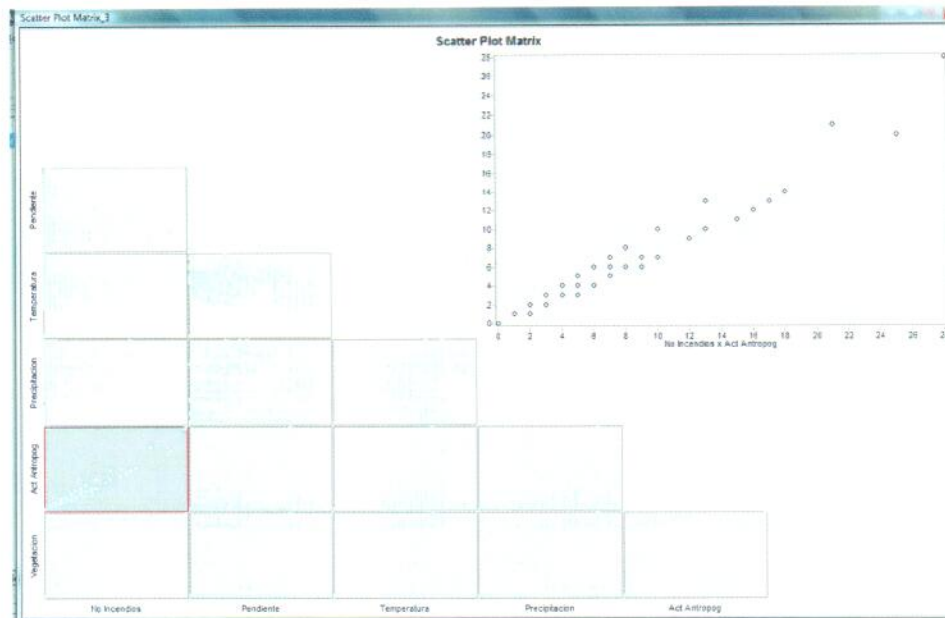


Figura. 2. Proceso para encontrar variables clave.

Cuadro 1. Variables más significativas.

Variable	Coefficiente	Probabilidad	Pr Robusta	VIF [1]
Intercepto	-0.025807	0.062769	0.000041*	-----
Tipo de veg.	0.003498	0.000000*	0.032191*	1.975023
Precipitación	0.000785	0.024392*	0.000235*	1.267740
Int. Uso Suelo	1.127426	0.000000*	0.000000*	1.733228

Los resultados para el modelo ajustado indican que las variables explicatorias guardan una estrecha relación con la variable dependiente, ya que los resultados muestran un R^2 ajustado de 0.976 y un valor de 757.28 para Akaike Information Criterion (AIC), donde para este caso los valores bajos indican que el modelo es el que mejor explica la relación entre variables (Cuadro 2 y Figura 3).

Cuadro 2. Diagnostico del OLS.

Criterio de Información (AIC)	757.288209	
R ² ajustada	0.976243	
Estadístico Joint F	18382.859397	0.000000*
Estadístico Joint Wald	3510.882899	0.000000*
Estadístico Koenker (BP)	1113.182388	0.000000*
Estadístico Jarque-Bera	75922.027623	0.000000*

Se utilizó la metodología GWR (Regresión Geográficamente Ponderada) con Kernels adaptativos para estimar la influencia local de las características de cada unidad cartográfica sobre la concentración de incendios por unidad. Los resultados de este modelo local de regresión muestran un R^2 ajustado de 0.978 y 757.28 para AICc, lo que indica que este modelo explica mejor la relación entre las variables respuesta y la variable dependiente.

Como se puede observar en la Figura 4, los resultados se presentan en mapas de residuales donde se muestran las predicciones más altas y las más bajas de las variables distribuidas a través del espacio de cada una de las unidades cartográficas.

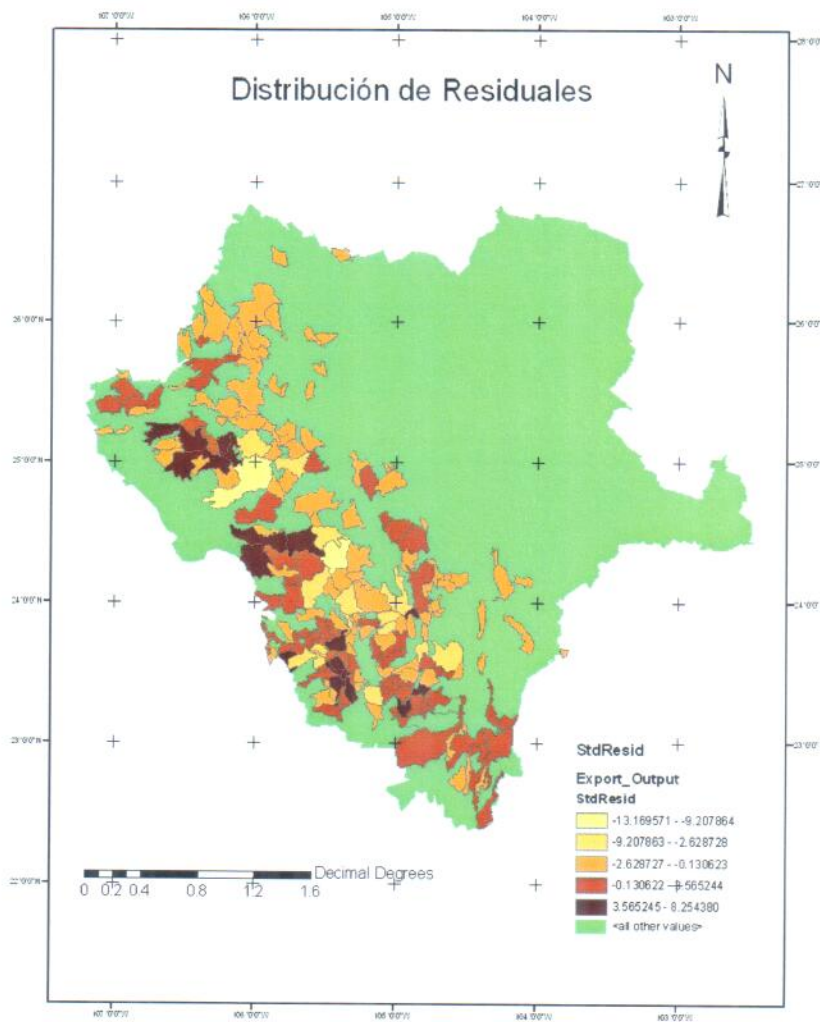


Figura 4. Distribución de residuales

Así con los resultados obtenidos se comprueba la hipótesis de que el patrón espacial que muestran los incendios está altamente influenciado por la intensidad antropogénica en el cambio de uso de suelo siendo las actividades más determinantes el uso forestal, seguido de las actividades pecuarias así como las actividades relacionadas con la agricultura de riego y la temporal.

3.5 Discusión

Estos resultados concuerdan con los mostrados por Badia *et al.* (2000) quienes mostraron estadísticamente que la distribución de incendios en España responde a patrones de comportamiento de acuerdo a la tipología del territorio y de sus funciones. De igual manera coinciden con los mostrados por Roman y Martínez (2006) quienes encontraron que la alta densidad de incendios registrados en Reservas de la Biosfera en el estado de Chiapas obedecía a la extensión de las áreas agropecuaria y a la alta densidad de caminos. Así mismo Maingi y Henry (2007) estudiaron los factores que influyen la ocurrencia de incendios en Kentucky, USA, mostrando que existe una relación significativa entre la distancia a las carreteras y a los asentamientos humanos y la ocurrencia de incendios. Resultados similares mostró el estudio de Han- Bin *et al.* (2007) quienes estudiaron el patrón espacial de ocurrencia de incendios para Corea; encontrando que la densidad de población y la distancia a carreteras se relacionaban más con dicha ocurrencia.

De forma análoga Catry *et al.* (2007) evaluaron la distribución espacial de los incendios en Portugal, los resultados de dicho análisis mostraron que la mayor parte de los incendios se concentró en áreas con altas densidades de población, donde fueron causados intencionalmente. Estos resultados enfatizan el rol crucial de las actividades antropogénicas en la distribución espacial de los incendios.

En el presente estudio solo se consideraron como factores bióticos a la precipitación, temperatura, vegetación y pendiente, de las que sólo resultaron altamente significativos la precipitación y la vegetación, lo que demuestra que los factores bióticos cambian en el tiempo y en el espacio y no pueden ser considerados como los mejores factores que explican la concentración de incendios en ciertas áreas. Lo anterior concuerda con el estudio realizado por Romero *et al.* (2008), quienes indican que la investigación de incendios forestales se ha centrado en los aspectos biológicos y físicos de los mismos, con relativamente menos atención a la importancia de los factores sociales. Atendiendo esto y con los recientes cambios en la actividad humana y los patrones de asentamiento en muchas partes de España, analizaron los factores causales de los incendios forestales en el sur oeste de la Comunidad de Madrid donde sus resultados muestran que los patrones espaciales de los incendios forestales están fuertemente asociados con el acceso humano al paisaje natural, con la proximidad a zonas urbanas y carreteras con lo que se observó la necesidad de considerar la actividad humana en los modelos de riesgo de incendios forestales.

No obstante estudios como el de Cardille *et al.* (2001) quienes analizaron los factores ambientales y sociales que influyen en la ocurrencia de incendios para Minnesota, Wisconsin y Michigan en Estados Unidos, muestran que las variaciones en la cubierta vegetal, tipo de suelo, la densidad de los asentamientos humanos y estrategias de gestión de las tierras pueden influir en las diferencias de la distribución espacial de los incendios, ya que sus resultados indican que la distribución espacial de los incendios en esta zona

son el resultado de la conjugación de factores ambientales y sociales, donde no hay un solo factor o factor de tipo dominante.

3.6 Conclusiones

Queda de manifiesto que la influencia humana en sus distintas formas es en su mayoría el factor determinante en la ocurrencia de incendios forestales y esta debe ser considerada como parte fundamental en la elaboración de programas de prevención de incendios así como en aquellos donde se establezca el uso del fuego dentro de actividades donde sea necesario.

La técnica utilizada mostro ser funcional ya que es estadísticamente explicativa de la relación espacial de la ocurrencia de incendios con respecto a su localización, se puede concluir que la técnica es replicable con las adaptaciones locales que sean necesarias.

De igual manera se muestra la necesidad de abordar la elaboración de un índice de riesgo para el estado considerando su alta diversidad ecosistémica y la compleja fisiografía que la acompaña dando así pauta para trabajos futuros.

3.7 Literatura citada

- Avila F, D.Y., M. Pompa-G. y E. Vargas P. 2009. Análisis espacial de la ocurrencia de incendios en el estado de Durango. (En prensa).
- Badia, P., A. M. Pallarès B y J. Piñol P. 2000. Análisis de Cuadrados para Analizar la Concentración de Igniciones en Áreas Urbanas y Rurales. Los casos del Área Metropolitana de Barcelona y la Comarca del Bages. Tecnologías Geográficas para el Desarrollo Sostenible Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá, 2000: 367-380.
- Cardille, J., A. S., J. Ventura and M. G. Turner. 2001. Environmental and social factors influencing wildfires in the upper midwest, United States. *Ecological Applications*, 11(1), 2001, pp. 111–127
- Castillo S, M., G. Julio A. y P. Pedernera A. 2002. Diseño e implementación de herramientas computacionales para la prevención y combate de incendios forestales. Laboratorio de Incendios Forestales. Universidad de Chile. 15 p.
- Catry, F. X., P. Damasceno, J. S. Silva, M. Galante and F. Moreira. 2007. Spatial Distribution Patterns of Wildfire Ignitions in Portugal. (en línea), Disponible: <http://www.eufirelab.org/toolbox2/library/upload/2380.pdf> [acceso, Agosto 2009]
- Charlton, M. and A. S. Fotheringham. 2009. Geographically weighted regression, white paper. National Centre for Geocomputation National University of Ireland Maynooth Maynooth, Co Kildare, Ireland. 17 p.
- Dong, X., G. Shao, D. Limin, H. Zhanqing, T. Lei and W. Hui. 2006. Mapping forest fire risk zones with spatial data and principal component analysis. *Science in China*, 49(1): 140-149.
- Drury, S. A. and T. T. Veblen. 2008. Spatial and temporal variability in fire occurrence within the Las Bayas Forestry Reserve, Durango, Mexico. *Plant Ecol* (2008) 197:299–316
- González E, S., M. González E. y L. M. Márquez 2007. Vegetación y Ecorregiones de Durango. Instituto Politécnico Nacional. México. 219 p.
- Han- Bin, K., W.K. Lee, M. S. Won, K.S. Koo, M. B. Lee and S. C. Lee. 2007. Spatial and temporal pattern of the huma-caused forest fire occurrences in Korea. Korea University, Seoul, Korea, Department of Forest environment, Korea Forest Research Institute.
- INEGI 2000. Página electrónica del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México. <http://www.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/dgo.htm>
- Krishna, P. V., A. Eaturu and K. V. S. Badarinath. 2006. Spatial distribution of forest fires and controlling factors in Andhra Pradesh, India using spot satellite datasets. *Environmental Monitoring and Assessment* (2006) 123: 75–96.

Martínez F., J. 2004. Análisis, estimación y cartografía del riesgo humano de incendios forestales. Tesis Doctoral. Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá. Alcalá de Henares. España. 337 p.

Maingi K, J. and M. C. Henry. 2007. Factors influencing wildfire occurrence and distribution in eastern Kentucky, USA. *International Journal of Wildland Fire* 16(1) 23–33.

PROFEPA (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente) 2009. Estado de Durango Recursos Naturales. Página electrónica <http://www.profepa.gob.mx/PROFEPA/DelegacionesPROFEPA/Durango/RecursosNaturales/INSPECCION+FORESTAL.htm>

Rentería A., J. B. 2004. Desarrollo de modelos para el control de combustibles en el manejo de ecosistemas forestales en Durango, México. Tesis de Doctorado en Ciencias. Universidad Autónoma de Nuevo León. 125 p.

Rodríguez T., D. A., H. Ramírez M, H. Tchikoué y J. Santillán P. 2008. Factores que inciden en la siniestralidad de los incendios forestales. *Ciencia Forestal en México*, 33 (104):38-57.

Roman C., R. M. y J. Martínez V. 2006. Effectiveness of protected areas in mitigating fire within their boundaries: Case study of Chiapas, Mexico. *Conservation Biology* 20(4):1074-1086.

Romero C., R., C, J. Novillo, J. D. A. Millington and I. Gomez-Jimenez. 2008. GIS analysis of spatial patterns of human-caused wildfire ignition risk in the SW of Madrid (Central Spain). *Landscape Ecol.*,23:341–354.

Syphard, A. D., V. C. Radeloff , N. S. Keuler , R. S. Taylor, T. J. Hawbaker, S. I. Stewart and M. K. Clayton. 2008. Predicting spatial patterns of fire on a southern California landscape. *International Journal of Wildland Fire* 17(5) 602–613.

SEMARNAT y Colegio de Postgraduados. Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana escala 1:250,000. Memoria Nacional 2001-2002.

Tobler, W. R. 1970. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*, 46: 234–240.

Yang, J., H. S. He, S. R. Shifley and E. J. Gustafson. 2007. Spatial Patterns of Modern Period Human-Caused Fire Occurrence in the Missouri Ozark Highlands. *Forest Science*, 53(1):1-15.

IV. DISCUSIÓN GENERAL

Chuvieco *et al.* (1998) indican que fenómeno de los incendios es claramente territorial, ya que tanto sus factores como sus efectos se manifiestan en el espacio, lo cual concuerda con los resultados obtenidos en el presente estudio al encontrar que los incendios en el estado de Durango tiende a presentar un patrón espacial de ocurrencia altamente autocorrelacionado, es decir, tiende a la concentración del fenómeno mostrando claramente su manifestación territorial, esto derivado de la similitud entre factores dentro del área, lo que lleva directamente a una relación con la primera ley geográfica de Tobler (1970) que considera que todo está relacionado con todo, pero las cosas más cercanas están más relacionadas que las cosas más distantes.

Así mismo, nuestros resultados concuerdan con los mostrados por Gordi *et al.* 1996; Lourenço y Gonçalves (1990); Han-Bin *et al.* (2006), quienes analizaron los patrones espaciales de este fenómeno y en donde sus resultados al igual que los presentados en el presente, muestran la tendencia hacia la concentración de incendios, atribuyendo esta tendencia a las causas de los incendios; derivando esto en la evaluación de dichos factores, que influyen y determinan el patrón espacial de incendios.

Los resultados de la evaluación estadística de dichos factores indican que la principal causa que determina la conducta del patrón espacial, es la asociada con la influencia de la actividad antropogénica en el cambio de uso de suelo en las zonas de concentración significativa de incendios.

La influencia antropogénica a través de actividades como la agricultura, el sobrepastoreo y las actividades derivadas de la actividad forestal, así como la alta producción de cultivos ilícitos son las que determinan y explican la concentración espacial de los incendios.

Estos resultados están línea con los mostrados por Syphard *et al.* (2008); Yang *et al.* (2007); Dong *et al.* (2006); Krishna *et al.* (2006) quienes destacan en sus resultados que las actividades relacionadas con el uso del suelo son la que explican los patrones espaciales de los incendios.

Con estudios relacionados realizados para México, nuestros resultados coinciden con los mostrados por Roman y Martínez (2006) y Rodríguez *et al.* (2008) quienes muestran que la alta ocurrencia de incendios, así como su potencial afectación esta principalmente asociada a las actividades humanas y el uso de suelo.

V. CONCLUSIONES GENERALES

Con base en los resultados obtenidos se concluye que existe una alta autocorrelación espacial de los incendios forestales. La identificación de las causas de dicho patrón están relacionadas con actividades antropogénicas de cambio de uso de suelo, además de la vegetación y la precipitación.

De igual manera queda de manifiesto que la técnica utilizada fue la apropiada para el análisis estadístico de datos espaciales y que además es replicable con las adaptaciones a las que haya lugar.

Esto lleva a dar pauta para la realización de trabajos futuros, como podría ser la elaboración de un índice de peligro de incendios para el estado de Durango, considerando los distintos factores de riesgo que la escala regional brinde. Ello da oportunidad de predecir la posibilidad de que se presenten incendios forestales, con el objetivo de estar preparados para su combate, prevención, así como desempeñar mejores labores de supresión, reducción de daños y que además de lograr la eficiencia en el uso de los recursos humanos, materiales y financieros.

VI. LITERATURA CITADA

- Arnaldos V, J., X. Navalón N, E. Pastor F, E. Planas C y L. Zárate L. 2004. Manual de ingeniería básica para la prevención y extinción de incendios forestales. Mundi-Prensa. 414 p.
- Chuvieco E., M. P. Martín, J. Martínez y F. J. Salas. 1998. Geografía e Incendios Forestales. Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá. Serie Geográfica. Vol. 7 1998. 11-17 pp. Alcalá de Henares, Madrid.
- Dong, X., G. Shao, D. Limin, H. Zhanqing, T. Lei and W. Hui. 2006. Mapping forest fire risk zones with spatial data and principal component analysis. *Science in China*, 49(1): 140-149.
- Gordi, J., J. Pintó y J. Vila. 1996. L'estudi deis incendis en el vaéa mediterranean Documeros d'AnMisi Geográfica 28: 135-151.
- Han- Bin, K., W.K. Lee, M. S. Won, K.S. Koo, M. B. Lee and S. C. Lee. 2007. Spatial and temporal pattern of the huma-caused forest fire occurrences in Korea. Korea University, Seoul, Korea, Department of Forest environment, Korea Forest Research Institute.
- Krishna, P. V., A. Eaturu and K. V. S. Badarinath. 2006. Spatial distribution of forest fires and controlling factors in Andhra Pradesh, India using spot satellite datasets. *Environmental Monitoring and Assessment* (2006) 123: 75-96.
- Lourenço, O.L. and A.B. Gonçalves. 1990. Cartography of forest fires recorded In Central Portugal from 1983 to 1989. *M Corrf. Forest Fire Research*. Coimbra, Portugal: A (08):1-16.
- Rentería, A., J. B. 2004. Desarrollo de modelos para el control de combustibles en el manejo de ecosistemas forestales en Durango, México. Tesis de Doctorado en Ciencias. Universidad Autónoma de Nuevo León. 125 p.
- Rodríguez T., D. A., H. Ramírez M, H. Tchikoué y J. Santillán P. 2008. Factores que inciden en la siniestralidad de los incendios forestales. *Ciencia Forestal en México*, 33 (104):38-57.
- Rodríguez T., D. A. 1996. Incendios forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Multi-Prensa México, S.A de C.V. 630 p.
- Roman C., R. M. y J. Martínez V. 2006. Effectiveness of protected areas in mitigating fire within their boundaries: Case study of Chiapas, Mexico. *Conservation Biology* 20(4):1074-1086.
- Syphard, A. D., V. C. Radeloff , N. S. Keuler , R. S. Taylor, T. J. Hawbaker, S. I. Stewart and M. K. Clayton. 2008. Predicting spatial patterns of fire on a southern California landscape. *International Journal of Wildland Fire* 17(5) 602-613.

Tobler W. 1970. A computer movie simulation urban growth in the Detroit region. *Economic geography* 46(2):234-240.

Yang, J., H. S. He, S. R. Shifley and E. J. Gustafson. 2007. Spatial Patterns of Modern Period Human-Caused Fire Occurrence in the Missouri Ozark Highlands. *Forest Science*, 53(1):1-15.