

EVALUACIÓN DEL RIESGO DE INCENDIO ESTACIONAL USANDO NOAA-AVHRR: CONSIDERACIONES PRELIMINARES EN MÉXICO

L. Manzo-Delgado (*), S. Sánchez-Colón (*) y R. Álvarez (**).

(*) *Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria.
C. P. 04510 Coyoacán, México D.F. lmanzo@igg.unam.mx*

(**) *Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria. C. P. 04510 Coyoacán, México, D.F. rab@leibniz.iimas.unam.mx*

RESUMEN

Se construyó y validó un modelo logístico para evaluar el riesgo de incendio forestal estacional en la región central de México. Para ello, fueron consideradas variables predictivas estáticas y dinámicas: elevación, exposición del terreno, pendiente, vegetación, precipitación, NDVI, TST y nubes. Las tres últimas variables fueron derivadas de las imágenes NOAA-AVHRR, cuatro meses antes (noviembre-febrero) del inicio de la temporada de incendios (marzo-mayo). Los incendios forestales fueron detectados como puntos de calor en las imágenes nocturnas, durante cuatro temporadas consecutivas (1997 a 2000). Las variables del modelo fueron seleccionadas utilizando la estrategia por eliminación hacia adelante. La precisión del modelo se estimó en 79.8%, el cual disminuyó algunas unidades en la validación. La probabilidad de ocurrencia de incendio para cada temporada se representó cartográficamente.

ABSTRACT

A logistic model was constructed to assess of seasonal forest fire risk and tested over the central region of Mexico. It incorporates both static and dynamic predictive variables: elevation, aspect, slope, vegetation, precipitation, NDVI, TST, and cloud. The latter three variables were derived from NOAA-AVHRR images from the four months previous to the fire seasons. Actual forest fires were detected on night-time images like hot-spots from each March-May period from 1997 to 2000. Variables included in the model were chosen following a stepwise strategy. The accuracy of the model was estimated to be 79.8%. The probability of forest fire occurrence for each fire season was mapped.

Palabras clave: riesgo de incendios forestales, alerta temprana, NDVI, TST, modelo logístico.

INTRODUCCIÓN

En México, al igual que otros países, las acciones de prevención, detección y combate de incendios forestales han sido insuficientes para reducir el número e intensidad de estos eventos, los cuales han mantenido una tendencia creciente por más de tres décadas. Esto se atribuye no sólo a las actividades agropecuarias, sino también por las condiciones meteorológicas extremas inducidas por fenómenos como El Niño Oscilación del Sur – ENOS, la variabilidad climática y el calentamiento global (Rowell y Moore 2000). Una alternativa es evaluar con anticipación que tan intensa será cada temporada y que tan vulnerable puede una superficie a incendiarse. Para lograr esto se propuso evaluar el riesgo de incendio estacional, el cual se define como la probabilidad de que ocurra un incendio en un área determinada (Chou et al. 1993)

Por varios años las técnicas de teledetección han proporcionado un medio confiable para evaluar el riesgo de incendio (Leblon 2001). Por su resolución temporal,

radiométrica y espacial, la información del sensor NOAA-AVHRR ha sido utilizada ampliamente para estudiar los incendios: Detección de fuegos activos como puntos de calor (Flasse y Ceccato 1996); monitoreo del estado del material combustible, mediante los índices de vegetación como el NDVI (Maselli et al. 2003) y las condiciones meteorológicas, a través del cálculo de la temperatura de la superficie terrestre – TST (Manzo-Delgado et al. 2004).

El objetivo de este trabajo fue construir un modelo logístico para evaluar el riesgo de incendio estacional, a partir de variables extraídas de las imágenes NOAA-AVHRR y cartografía temática disponible, considerando como área en estudio una parte de la región central de México.

AREA EN ESTUDIO

Cada año, en la región central de México ocurren numerosos incendios en una estación bien marcada entre marzo y mayo, justo al inicio de la primavera y antes de las lluvias de verano. En

1998, bajo la influencia del ENSO, esta región registró 6000 incendios que afectaron 32,000 ha (46% del total nacional) (SEMARNAP 1998). Debido a ello, se consideró una región interesante para evaluar el riesgo de incendio estacional.

El área se localiza en la región central de México, sus coordenadas extremas son 18°18' a 20°17' N y 98°27' a 100°30' W, incluye en su totalidad los estados de México, Morelos y el Distrito Federal (Ciudad de México), así como parte de los estados colindantes. Cubre una superficie de 41,800 Km², en un intervalo altitudinal entre 330 y 5400 m. En la parte sur, en altitudes menores a 1800 m, dominan climas cálidos que favorecen el establecimiento del bosque tropical caducifolio y pastizales. En el centro y norte, en altitudes más altas, prevalecen climas semiáridos, templados y fríos, creando condiciones apropiadas para el establecimiento de matorrales, bosques templados y pastizales (SEMARNAT 2001).

EXTRACCIÓN DE VARIABLES A PARTIR DE AVHRR-NOAA Y MAPAS TEMÁTICOS

Las imágenes nocturnas y diurnas AVHRR-NOAA del periodo noviembre – mayo, de 1996 a 2000, fueron captadas en la estación receptora TeraScan de la ciudad de México (Álvarez et al. 1998). Éstas se sometieron a procesos de corrección atmosférica, radiométrica y geométrica utilizando los programas de extracción, calibración y navegación disponibles en la propia estación TeraScan. Al final se georeferenciaron en proyección cónica conforme de Lambert. Cada imagen se recortó con las coordenadas extremas del área en estudio.

La cartografía temática digital facilitó la construcción de un Sistema de Información Geográfica (SIG) del área en estudio, incluyendo el modelo de elevación, precipitación y el Inventario Nacional Forestal 2000 (SEMARNAT 2001).

Variables de respuesta

Los incendios forestales se detectaron como puntos de calor en las imágenes nocturnas del periodo marzo-mayo de 1997 a 2000. Para ello, se utilizó una versión modificada del algoritmo contextual de Flasse y Ceccato (1996) que utiliza los canales térmicos T₃ (3.55–3.93 µm) y T₄ (10.3–11.3µm). Para cada temporada se construyó un mapa de incendios acumulativo. La precisión de éstos fue evaluada tomando como referencia los reportes municipales elaborados por la Secretaría de Medio Ambiente y Recurso Naturales

(SEMARNAT). 85% de los puntos de calor (836) fueron validados como incendios forestales, los cuales se distribuyeron de la siguiente manera: 34 en 1997; 704 en 1998; 66 en 1999 y 135 en 2000. El 65% ocurrieron en el intervalo altitudinal de 2000 a 3500 m. El 80% se presentó en el bosque templado, los pastizales y el bosque tropical caducifolio (Figura 1).

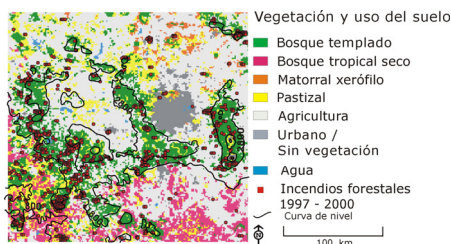


Figura 1. Incendios forestales (puntos de calor) sobre el mapa de vegetación y uso del suelo.

Como parte de las variables de respuesta se incluyeron 869 puntos al azar de no-incendios: 45 en 1997, 740 en 1998, 84 en 1999 y 132 en 2000. Los incendios y no-incendios de las temporadas 1997–1999 se utilizaron construir el modelo; los correspondientes a la temporada 2000 se dejaron para el proceso de validación.

Variables predictivas dinámicas

El NDVI definido como $\text{NIR-R}/\text{NIR+R}$, fue calculado a partir de los valores de reflectancia de las bandas espectrales del rojo ($R = 0.58\text{--}0.68 \mu\text{m}$) y el infrarrojo cercano ($\text{IR} = 0.72\text{--}1.10 \mu\text{m}$), como. El producto fue escalado para obtener valores positivos en un intervalo de 0 a 255. Se construyeron compuesto del máximo valor para 10 y 30 días. El NDVI sigue una tendencia decreciente durante la época seca (noviembre-abril), alcanzando el mínimo antes de la temporada lluviosa, lo que favorece el inicio y propagación del fuego. En 1998, bajo influencia del ENOS, en abril el NDVI registró los valores más bajos (149-166), explicando en parte la alta ocurrencia de incendios. En este contexto, se consideró que la tendencia que sigue el NDVI antes de cada temporada de incendios (Figura 2), podía funcionar como un indicador de riesgo. Para probar esto se definieron las siguientes variables predictivas: $\Delta\text{NDVI}_{\text{nov-feb}}$ (valor máximo y mínimo del NDVI registrados de noviembre a febrero); $\text{NDVI}_{\text{nov-feb ratio}}$ (razón entre el mínimo y máximo NDVI registrados entre noviembre y febrero); NDVI_{dec} , NDVI_{ene} y NDVI_{feb} (máximo valor de composición mensual de NDVI para diciembre, enero y febrero).

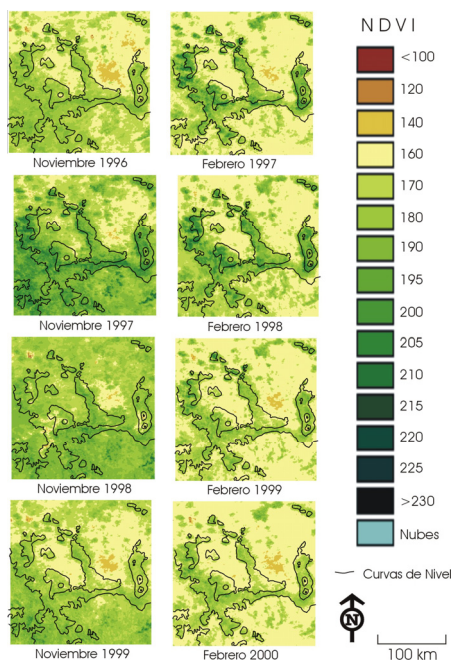


Figura 2. Composición mensual del NDVI de noviembre y febrero, que muestran las diferencias antes de que comience la temporada de incendios.

La variable TST fue obtenida a través del algoritmo de ventana dividida (Becker y Li 1990); los valores de emisividad fueron obtenidos promediando las clases de suelo y vegetación (Rubio et al. 1997). Se construyeron compuestos del máximo valor de composición para 10 y 30 días. Un análisis previo de la TST en el área en estudio (Manzo-Delgado et al. 2004), permitió observar que esta variable sigue una tendencia creciente desde el inicio hasta el final de la estación seca. Durante la dramática temporada de incendios 1998, bajo la influencia del ENOS, los mayores valores de TST (51°C) se presentaron en abril, cuando se registraron numerosos incendios forestales (312). Considerando la tendencia de la TST, se definieron las siguientes variables predictivas para el modelo: $\Delta TST_{nov-feb}$; $TST_{nov-feb}$ ratio; TST_{dec} , TST_{ene} y TST_{feb} .

La cobertura de nubes (Saunders y Kriebel 1988) durante la época seca, anterior a la temporada de incendios, también fue considerada como una variable predictiva de riesgo de incendios. Esta se obtuvo dividiendo el número de veces que cada pixel estuvo cubierto por nubes entre el número total de imágenes disponibles.

Variables predictivas estáticas

A partir del modelo digital del terreno se derivaron la altitud, la pendiente y exposición del terreno del área en estudio. La reagrupación del Inventario Forestal Nacional 2000 (SEMARNAT 2001) permitió identificar 7 clases de vegetación y uso del suelo: bosque templado, bosque tropical seco, matorral xerófito, pastizal, tierras agrícolas, agua y áreas urbanas o desprovistas de vegetación. La precipitación promedio anual se obtuvo a partir del mapa de isoyetas.

Todas las variables se convirtieron en capas raster con la misma resolución espacial y proyección que las imágenes AVHRR-NOAA y se integraron en un solo SIG, facilitando la representación cartográfica del modelo.

MODELO

Para evaluar el riesgo estacional se eligió el modelo logístico (Chou et al. 1993), mediante el cual es posible pronosticar la probabilidad de ocurrencia de incendios como:

$$P = \frac{e^{b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k}}{1 + e^{b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k}} \quad (1)$$

donde $x_1, x_2, \dots, x_k$ son las k variables predictivas dinámicas (NDVI, TST y nubes) o estáticas (altitud, exposición del terreno, pendiente, vegetación y precipitación); en tanto que $b_1, b_2, \dots, b_k$ son sus correspondientes coeficientes. Las variables fueron seleccionadas mediante la estrategia por eliminación hacia adelante (Crawley 1993). Cada variable se probó en turno y solamente aquellas que ocasionaron una disminución significativa ($P < 0.05$) en la devianza residual se incluyeron en el modelo final. Como se ha sugerido en otros estudios, el modelo se ajustó a un nivel de 0.5. De esta manera se disminuye el riesgo de incluir demasiadas variables o de omitir algunas importantes. Las variables seleccionadas fueron: $NDVI_{ene}$, TST_{feb} , tipos de vegetación, pendiente, elevación y precipitación. Tomando como referencia la sensibilidad, la especificidad y la curva de características operativas (ROC), la precisión del modelo se estimó en 79.73 %. La validación se realizó para la temporada 2000. Utilizando un nivel de corte de $P=0.525$, la precisión del modelo para esta temporada fue de 69.3%, la cual se consideró bastante aceptable.

A partir del modelo final, se construyeron mapas de probabilidad de ocurrencia de incendios para las temporadas 1997 a 2000. Los pixeles con probabilidades > 0.525 (nivel de corte óptimo) son

aquellos donde el fuego podría ser esperado. Las probabilidades se dividieron en seis clases: *muy baja*, *media baja*, *baja*, *alta*, *media alta* y *muy alta*. Los mapas muestran un patrón de riesgo de incendio diferente para cada temporada de incendios (figura 3).

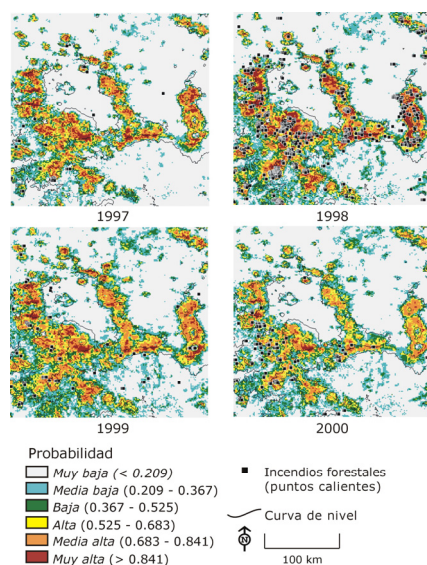


Figura 3. Probabilidad de ocurrencia de incendios forestales, estimada a partir del modelo logístico y tres temporadas de incendio (1997-1999). La validación se aplicó a la temporada 2000.

CONCLUSIONES

Las técnicas de teledetección y las imágenes de satélite AVHRR-NOAA constituyen un recurso único para analizar la distribución espacial y temporal tanto de los incendios como de los factores ambientales que determinan su ocurrencia, particularmente el estado de la vegetación (NDVI) y las condiciones meteorológicas (TST). En complemento los SIG y los modelos estadísticos de regresión logística conforman un medio excelente para evaluar el riesgo de incendios estacional.

BIBLIOGRAFÍA

Álvarez, R., Gómez, G., Macías, L. y Salmerón, O. 1998. The AVHRR receiving station at the Institute of Geography, UNAM, in Mexico. *Proc. 7th Annual Int. TeraScan Users Conf. Nat. Center Atmospheric Res.* Boulder, CO. SeaSpace Corp. San Diego, CA.

Becker, F. y Li, Z.L. 1990. Towards a local split window method over land surface, *International Journal of Remote Sensing* 11: 369-393.

Chou, Y.H., Minnich R.A. y Chase R.A. 1993. Mapping probability of fire occurrence in San Jacinto Mountains, California, USA, *Environmental Management* 17:129-140.

Crawley, M. 1993. *GLIM for Ecologists*. Blackwell Scientific Publications. Oxford.

Flasse, S.P. y Ceccato, P. 1996. A contextual algorithm for AVHRR fire detection. *International Journal of Remote Sensing* 17:419-424.

Leblon, B. 2001. Forest wildfire hazard monitoring using remote sensing: A review. *Remote Sensing Reviews* 20: 1-57.

Manzo-Delgado L., Aguirre-Gómez, R. y Álvarez, R. 2004. Multitemporal analysis of land surface temperature using NOAA-AVHRR: preliminary relationships between climatic anomalies and forest fires. *International Journal of Remote Sensing* 25, 4417-4423.

Maselli, F., Romanelli, S., Bottai, L., Zipoly, G. 2003. Use of NOAA-AVHRR NDVI images for the estimation of dynamic fire risk in Mediterranean areas. *Remote Sensing of Environmental* 86:187-197.

Rowell, A. y Moore, P.F. 2000. Global review of forest fires. *WWF – The World Wide Fund / IUCN – The World Conservation Union*.

Rubio, E., Caselles, V. y Badenas, C. 1997. Emissivity measurements of several soils and vegetation types in the 8-14 μ m wave band: Analysis of two field methods. *Remote Sensing of Environment* 59: 490-521.

Saunders, R.W. y Kriebel, K.T. 1988. An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing* 9: 123-150.

SEMARNAP. 1998. *Los incendios Forestales en México: 1998*. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. México.

SEMARNAT. 2001. *Inventario Forestal Nacional 2000*, escala 1:250,000. Cartas Ciudad de México, Morelia, Cuernavaca y Chilpancingo. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.