

NOTA DE INVESTIGACIÓN

MODELO CONCEPTUAL DEL POTENCIAL DE INCENDIOS FORESTALES EN DURANGO: AVANCES PRELIMINARES

CONCEPTUAL MODEL OF WILDFIRES IN DURANGO: PRELIMINARY PROGRESS

Marín Pompa-García¹, Lemir Vázquez-Vázquez¹, Maico Zapata-Molina¹ y Raúl Solís-Moreno²

RESUMEN

En la actualidad, detectar y dar seguimiento a un incendio forestal es relativamente sencillo. Sin embargo, anticipar su presencia en términos espaciales y temporales constituye una tarea aún pendiente. Los incendios forestales han ocasionado grandes afectaciones a los ecosistemas duranguenses; en consecuencia, el estudio de su vulnerabilidad al fuego resulta de gran importancia. Así, el objetivo de este trabajo fue generar un modelo conceptual del potencial de los incendios forestales en Durango. El modelo se construyó mediante técnicas geoestadísticas, a partir de variables físicas, ecológicas y antropogénicas asociadas con patrones espaciales de recurrencia de áreas incendiadas. Los resultados para el modelo ajustado indicaron que las variables explicativas guardaron una estrecha relación con la variable dependiente, lo cual expone de manera satisfactoria la susceptibilidad del fuego de cada unidad cartográfica del área de investigación. Aunado a ello, se dispuso de una plataforma en internet que permitió el modelado dinámico para cualquier área geográfica del estado, a través de la inclusión de datos por parte del usuario. De tal forma que, la simulación permite crear escenarios probables, pesimistas y optimistas, en función del peso específico de aquellas variables definidas por el usuario. Se concluye que el modelo generado representa una alternativa útil para detectar la vulnerabilidad del entorno natural a los incendios forestales, lo que significa un aporte tecnológico y vanguardista en el modelado del fuego.

Palabras clave: Durango, fuego, GWR, peligro, regresión, riesgo.

ABSTRACT

Nowadays, detecting and tracking down wildfires has been relatively simplified. However, predicting their occurrence in spatial and temporary scales is still an unfinished task. Wildfires cause great damages to Durango's ecosystems. To study their vulnerability to fire is of great importance. The aim of this study was to generate a conceptual model of potential forest fires in Durango. This model was constructed by using geo-statistical techniques based on physical, ecological, and anthropogenic variables, associated with spatial patterns of recurrence of burned patches. For the fitted model, results indicate that the explanatory variables are closely related to the dependent variable, successfully explaining fire susceptibility in each cartography unit of study area. In addition, we use an available Internet platform that enables dynamic modeling for any geographic area of the state, through the inclusion of predictive variables from the user. This simulation allows the generation of probable, optimistic and pessimistic scenarios, depending on the specific weight of those user-defined variables. It is concluded that the conceptual model generated is a useful tool for determining the vulnerability of fires by their integration from the above components, constituting a cutting edge technological contribution in fire modeling.

Key words: Durango, fire, GWR, hazard, regression, risk.

Fecha de recepción: 1 de mayo de 2012

Fecha de aceptación: 20 de agosto de 2012

¹ Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Juárez del Estado de Durango. Correo-e: mpgarcia@ujed.mx

² Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera. Universidad Juárez del Estado de Durango.

Durango es un estado que presenta alta incidencia de incendios forestales, los cuales constituyen uno de los principales orígenes del deterioro de los ecosistemas, ya que alteran el equilibrio de la naturaleza y representan una de las causas más importantes de la pérdida de vegetación nativa; así como de, cambios sustanciales en el paisaje (Rodríguez *et al.*, 2008). La Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) en Durango registra a la entidad en el segundo lugar, a nivel nacional, en superficie afectada por incendios forestales con aproximadamente 5,084 ha, de ahí que resulte de gran importancia el estudio de las condiciones asociadas con su ocurrencia, para así modelar su potencial y definir estrategias para su control y combate. Aunque son diversas las investigaciones sobre la influencia de factores vinculados con la presencia de incendios (Ávila-Flores *et al.*, 2010a; Ávila-Flores *et al.*, 2010b; Muñoz *et al.*, 2005; Rodríguez *et al.*, 2008; Meza y Sepúlveda, 2009; Maeda *et al.*, 2011), el reto actual en Durango es la construcción de una herramienta que modele la conjunción de variables relacionadas con la presencia de incendios, y que sea eficiente en la representación de la vulnerabilidad real de cualquier territorio específico. Esta perspectiva geoespacial debe permitir al usuario simular escenarios a partir de diversas variables del ecosistema.

El objetivo del presente trabajo fue mostrar los avances actuales del modelo conceptual del potencial de los incendios forestales en Durango, cuya construcción se realizó mediante variables físicas, ecológicas y antropogénicas, para ello, se consideró como hipótesis que su aparición estaba ligada, de manera muy estrecha, con la diversidad espacial de dichas variables.

Descripción del área de estudio

Se ubica al suroeste del estado de Durango, entre 23° 07' y 23° 39' latitud norte y los 105° 12' y 105° 46' de longitud oeste, y posee una superficie total de 240,739 ha; con una topografía accidentada, en un sistema topomórfico de mesetas asociadas con cañadas, y una altitud comprendida entre 500 y 2,800 m. Los suelos se originan en el intemperismo de rocas ígneas y sus principales usos son el agrícola, pecuario y forestal (Meraz, 1998). Los climas corresponden a C(w₂): templado, subhúmedo, con lluvias de verano de 5 a 10.2% anual; (A)C(w₂): semicálido, templado subhúmedo, con lluvias de verano de 5 a 10.2% anual; Cb(w₂): templado, semifrío, con verano fresco largo, subhúmedo, con lluvias de verano de 5 a 10.2% anual; y Aw₁: cálido subhúmedo, con lluvias de verano de 5 a 10.2% anual (Pompa, 2012). En la Figura 1 se muestra la distribución de la incidencia de los incendios forestales reconocidos en una década para el área de estudio, de acuerdo a la información proporcionada por la delegación estatal de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2010).

The incidence of wildfires in the state of Durango is quite high. They are one of the main origins of ecosystem deterioration, since they alter the natural balance and are one of the main causes of the loss of native vegetation, as well as of substantial changes in the landscape (Rodríguez *et al.*, 2008). The National Forest Commission (CONAFOR, for its acronym in Spanish) in Durango has registered that the state is nationally in second place in terms of forest surface affected by wildfires, with approximately 5,084 ha. Therefore, studying the conditions associated with their occurrence is of vital importance, in order to model their potential and define strategies for controlling and fighting them back. Although there are several researches on the influence of factors associated with the presence of wildfires (Ávila-Flores *et al.*, 2010a; Ávila-Flores *et al.*, 2010b; Muñoz *et al.*, 2005; Rodríguez *et al.*, 2008; Meza and Sepúlveda, 2009; Maeda *et al.*, 2011), the current challenge in Durango is the development of a tool that models the combination of related variables with the presence of wildfires and that is efficient in representing the actual vulnerability of any specific territory. This geospatial perspective should let the user simulate scenarios using the diverse variables of the ecosystem.

The purpose of this study was to show the current progress of the conceptual model of wildfire potential in Durango, which was developed using several physical, ecological and anthropogenic variables. Thus, our hypothesis is that their appearance was closely linked with the spatial diversity of such variables.

Description of the study area

It is located in the southwest of the state of Durango, between 23° 07' and 23° 39' northern latitude, and between 105° 12' and 105° 46' western longitude. It has a total surface of 240,739 ha, a rugged topography in a topomorph system of plateaus associated with ravines, and a height that ranges from 500 to 2,800 m. The soils are originated in the weathering of igneous rocks, and their main uses are agricultural, for cattle and forest (Meraz, 1998). Its climates correspond to C(w₂): temperate, sub-humid, with annual summer rains ranging from 5 to 10.2%; (A)C(w₂): semi-warm, temperate sub-humid, with annual summer rains ranging from 5 to 10.2%; Cb(w₂): temperate, semi-cold, with a long cool summer, sub-humid, with annual summer rains ranging from 5 to 10.2%; and Aw₁: warm, sub-humid, with annual summer rains ranging from 5 to 10.2% (Pompa, 2012). Figure 1 shows the distribution of wildfire incidence acknowledged in a decade within the area of study, according to the data provided by the National Forest Commission regional office (CONAFOR, 2010).

Sequential process

The conceptual model of wildfire potential was developed for an area that is representative of the state's ecosystems, in which the stands for data collection were located. Each one was characterized by its diversity of environmental, physiographic



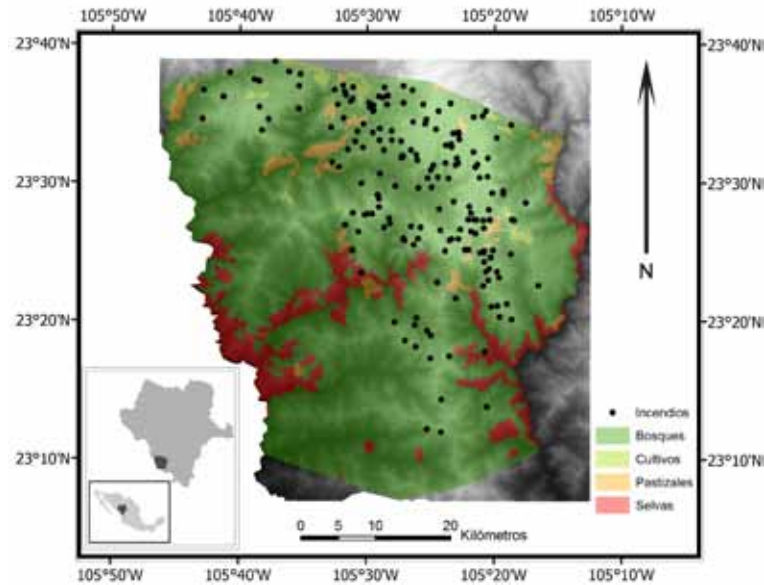


Figura 1. Localización del área de estudio con la incidencia de incendios forestales de 2001 a 2010.

Figure 1. Location of the area of study with wildfire incidence from 2001 to 2010.

Proceso secuencial

El modelo conceptual del potencial para incendios se desarrolló para un área representativa de los ecosistemas del estado, en la que se ubicaron los rodales donde se llevó a cabo la toma de datos. Cada uno se caracterizó por su diversidad de condiciones ambientales, fisiográficas y antropogénicas, por la presencia recurrente de incendios forestales; así como, por facilitar la gestión del manejo forestal a través del rodal, unidad básica administrativa utilizada de forma tradicional por los manejadores de bosques, que bajo esta perspectiva fue necesario definir como unidad mínima susceptible de cartografiarse que concentraba las variaciones en sus diferentes combinaciones específicas. La generación del modelo comprendió tres fases: 1) exploración, 2) modelado y 3) validación.

Fase exploración

Sobre el área de estudio se definieron 2,264 rodales, en los que se obtuvo información dasométrica y ecológica, con el formato clásico de los inventarios forestales (Meraz, 1998). Esta estructura sirvió de base para la integración del modelo; además, cuenta con la ventaja de poder replicarlo en cualquier otra superficie forestal, en la que se disponga de datos del inventario forestal, condición común en los bosques sometidos a manejo forestal en la entidad.

En un principio, se definió como variable dependiente el índice de recurrencia de incendios forestales ocurridos de manera histórica del año 2001 al 2010, cuyo establecimiento se

and anthropogenic conditions, by the recurring presence of wildfires, as well as for its facilitation of the management of forest handling through the stand, which is the basic management unit traditionally used by forest handlers that, under this perspective, was necessarily defined as the minimal unit for mapping that concentrated the variations in their different specific combinations. The development of the model included three phases: 1) exploration, 2) modeling, and 3) validation.

Exploratory phase

In the area of study, 2,264 stands were established, which collected ecological and mensuration data using the traditional format of forest inventory (Meraz, 1998). This structure was the base for integrating the model. Moreover, such model can be reproduced in any other forest surface where forest inventory data is available, which is a common condition of the forests subjected to forest handling within the state.

At first, the index of recurrence of wildfires that historically occurred between 2001 and 2010 was considered a dependent variable, determined as such using the G statistics, developed by Getis and Ord (1992). The independent variables taken into consideration were the total real stock (m^3), litterfall (cm), crown cover (m^2), temperature ($^{\circ}C$), rainfall (mm), elevation above mean sea level (m), inclination ($\%$), exposition (azimuth), road density ($m\ ha^{-1}$), and probability of changes in soil use ($\%$). The latter was also generated using the G statistics, considering the demographic density. The selection depended on the recommendations stated in the bibliography (Ávila-Flores *et al.*, 2010a; Ávila-Flores

determinó a partir del estadístico G , desarrollado por Getis y Ord (1992). Las variables independientes consideradas fueron las existencias reales totales (m^3), profundidad de hojarasca (cm), cobertura de copa (m^2), temperatura ($^{\circ}C$), precipitación (mm), altura sobre el nivel del mar (m), pendiente (%), exposición (azimut), densidad de caminos ($m\ ha^{-1}$) y probabilidad de cambio de uso de suelo (%), este último también se generó por medio del estadístico G , mediante la densidad de población demográfica. La selección obedeció a las recomendaciones consignadas en la literatura (Ávila-Flores *et al.*, 2010a; Ávila-Flores *et al.*, 2010b; Muñoz *et al.*, 2005; Rodríguez *et al.*, 2008), interpretaciones técnicas en campo, y al buen ajuste que se logró mediante la regresión geográficamente ponderada; aunque, en algunos casos, no se descartan problemas de multicolinealidad local (temperatura - precipitación, existencias reales totales - coberturas de copa - profundidad de hojarasca). Para todas las variables se hizo un mapeo, con la finalidad de observar tendencias, relaciones espaciales o, en su caso, detectar datos aberrantes a simple vista.

Fase modelación

Para la conformación del modelo cartográfico correspondiente al potencial de incendios forestales fue necesario determinar cuatro subíndices espaciales: 1) complejo de combustibles, construido a partir de las existencias reales totales (m^3), la profundidad de hojarasca (cm) y la cobertura de copa (m^2), con valores asignados a cada polígono de las unidades de manejo consideradas; 2) componente meteorológico, definido por la precipitación mínima acumulada (mm) y la temperatura máxima ($^{\circ}C$); 3) componente topográfico, constituido por la exposición (azimut), la pendiente (%) y la altitud (msnm); y 4) causalidad, integrado por la densidad de caminos ($m\ ha^{-1}$), la probabilidad de cambio de uso de suelo (%) y la frecuencia de recurrencia de incendios (%). Su integración esquemática se muestra en la Figura 2. Todas las variables generadas se correlacionaron mediante regresión geográficamente ponderada, para determinar su aporte dentro del modelo. Dicha regresión se realizó en Arcgis® versión 9.3, a través del estimador de mínimos cuadrados ordinarios (ESRI, 2008).

Estos criterios se incorporaron, en su totalidad, a un sistema de información geográfica por medio de la unión de los datos tabulares que acompañan a cada capa de información, para generar una sola base de datos, la cual se integró de tal manera que las hileras constituyeron las unidades cartográficas, y las columnas cada una de las variables antes mencionadas. El modelo conceptual del potencial de incendios forestales se construyó a partir de los valores de importancia dados a los componentes de combustibles, meteorológico, topográfico y de causa; es decir, fue una sumatoria lineal estandarizada en función de dichos componentes ponderados por su ubicación geográfica, de acuerdo a la siguiente expresión:

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

et al., 2010b; Muñoz *et al.*, 2005; Rodríguez *et al.*, 2008), the technical interpretations in the field, and the appropriate adjustment achieved through the geographically weighted regression. However, in some cases, problems of local multicollinearity were not discarded (temperature - rainfall, total real stock - crown cover - litterfall). Mapping of all variables was carried out in order to observe trends, spatial relations or, in any case, identify outliers at first sight.

Modeling phase

In order to configure the cartographic model that corresponds to the wildfire potential, it was necessary to determine four spatial sub-indexes: 1) fuel complex, built depending on total real stock (m^3), litterfall (cm) and crown cover (m^2), with values assigned to each polygon of the handling units taken into consideration; 2) meteorological component, determined by the minimum accumulated rainfall (mm), and maximum temperature ($^{\circ}C$); 3) topographic component, constituted by exposition (azimuth), inclination (%), and altitude (masl); and 4) causality, integrated by road density ($m\ ha^{-1}$), the probability of changes in soil use (%), and the frequency of wildfire recurrence (%). Their schematic integration is shown in Figure 2. All the generated variables were correlated through a geographically weighted regression, in order to determine their contribution within the model. Such regression was calculated with Arcgis® version 9.3, using the calculator of ordinary least squares (ESRI, 2008).

These criteria were wholly incorporated to a geographical information system through the conjunction of tabular data accompanying each information layer, in order to generate a single database, which was integrated in such a way that the rows constituted the cartographic units, and the columns represented each one of the variables mentioned above. The conceptual model of wildfire potential was built using the importance values assigned to the fuel, meteorological, topographic and causality components. In other words, it was a standardized linear combination in relation to said geographically weighted components, according to the following expression:

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

Here, y and x correspond to the dependent and independent variables, respectively; whereas $\beta_{0_i}(u)$ indicates that the parameter that describes the relation around the location (u) is specific for this location. A prediction can be made for the dependent variable, if the measurements of independent variables are also available in the place of (u).

Dynamic modeling

The previous procedure produced a static model of wildfire potential, since the data included were obtained for a particular

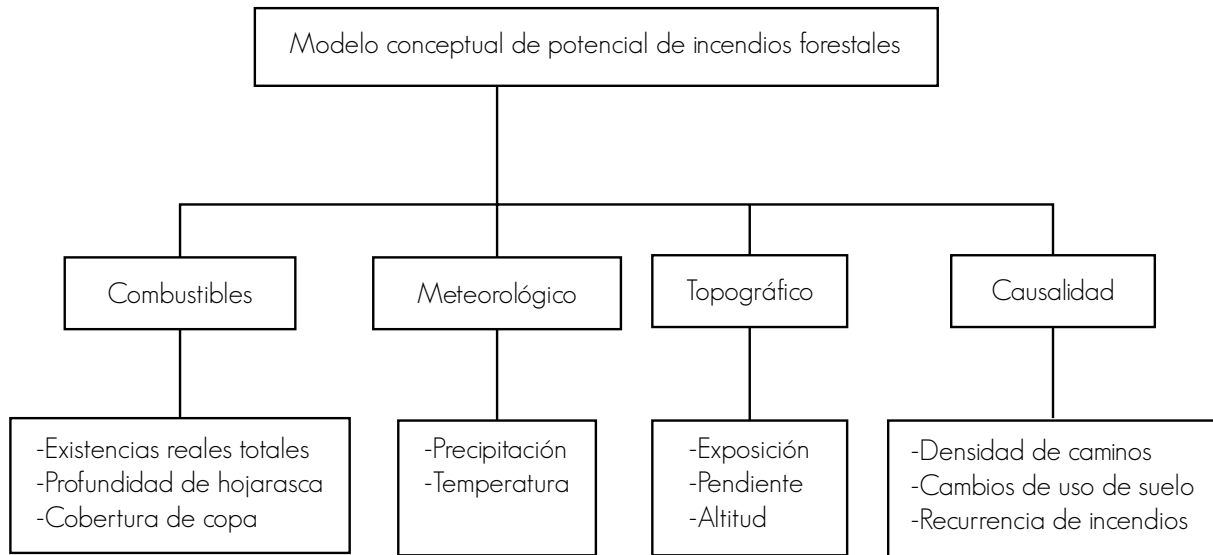


Figura 2. Esquema de la generación del modelo de potencial de incendios forestales: componentes y variables.
Figure 2. Construction scheme of the model of wildfire potential: components and variables.

Donde y y x corresponden a las variables dependiente e independiente, respectivamente; mientras que, $\beta_0(u)$ indica que el parámetro que describe la relación alrededor de la ubicación (u) es específico de ese lugar. Una predicción podrá realizarse para la variable dependiente, si las mediciones de las variables independientes también están disponibles en el lugar de (u).

Modelado dinámico

El procedimiento anterior arroja un modelo de potencial de incendios estático, dado que los datos incluidos se obtuvieron para una temporalidad puntual. Por ello, se desarrolló un modelo dinámico que mostrara la vulnerabilidad de incendios por unidad de manejo, bajo un enfoque de variación espacial y multitemporal. De manera complementaria, debía permitir la inclusión directa de las variables independientes, por parte del usuario, en una interfaz amigable, sencilla y automatizada, para generar diversos escenarios en cualquier superficie de la entidad duranguense. Una limitante fue la falta de cartografía a nivel unidad de manejo; por lo que se requirió generar píxeles de 100 x 100 m con cobertura estatal, mismos que se convirtieron a formato vectorial, para facilitar su operatividad. Con este propósito se desarrolló la aplicación para internet.

Fase modelación

Los estadísticos generados mediante el ajuste de mínimos cuadrados ordinarios se consignan en los cuadros 1 y 2.

time span. Therefore, a dynamic model that showed the wildfire vulnerability per handling unit was developed with an approach to spatial and multi-temporal variation. Complementarily, it should allow the direct inclusion of independent variables by the user, through a friendly, simple and automatized interface that could generate diverse scenarios in any surface of the state of Durango. One of the restrictions, however, was the lack of cartography at handling unit level, which made it necessary to generate pixels of 100 x 100 m with state coverage that were converted to vector format in order to make operability easier. The internet application was developed with this in mind.

Modeling phase

The statistics generated by adjusting the ordinary least squares are recorded in Tables 1 and 2.

The results for the adjusted model showed that the explicative variables were closely related to the dependent variable, since an adjusted R^2 above 9 and a value of -122998 for the Akaike information criterion (AIC) were registered. In this case, low values indicated that the model satisfactorily explained the relationship between variables.

F-Static and Wald-Static statistics show the total relevance of the model, which is statistically significant; moreover, the Jarque-Bera statistics indicate normal distribution of the residuals. The Geographically Weighted Regression method was used along with adaptive Kernels for estimating the local influence of the characteristics of each cartographic unit on the wildfire concentration per unit.

Cuadro 1. Estadísticos para las variables consideradas.
Table 1. Statistics for the variables taken into account.

| Variable | Coefficiente de regresión | Probabilidad | VIF** |
|--------------------------|---------------------------|--------------|-------|
| Frecuencia de incendios | 0.300913 | 0.0000* | 1.089 |
| Profundidad de hojarasca | 0.238598 | 0.0000* | 1.059 |
| Existencias reales | 0.238598 | 0.0000* | 1.29 |
| Cobertura de copa | 0.238598 | 0.0000* | 1.52 |
| Precipitación | 0.175530 | 0.0000* | 1.120 |
| Temperatura | 0.175530 | 0.0000* | 1.515 |
| Exposición | 0.175530 | 0.0000* | 1.184 |
| Pendiente | 0.175530 | 0.0000* | 1.188 |
| Densidad caminos | 0.300913 | 0.0000* | 1.004 |
| Cambio uso suelo | 0.300913 | 0.0000* | 1.087 |

*Estadísticamente significativo al 0.05; **Factor de inflación de varianza
*Statistically significant at 0.05; **Inflation factor of variance

Cuadro 2. Resultados estadísticos del ajuste del modelo.
Table 2. Statistic results of the adjustment of the model.

| | | |
|---|-----------------------|------------|
| Criterio de Información de Akaike (AIC) | -122998 | Prob. (>F) |
| R ² Ajustada | 0.98 | |
| Estadístico Joint F | 1 | 10,22* |
| Estadístico Joint Wald | 16.08x10 ⁶ | 0.000* |
| Estadístico Koenker (BP) | 87.00595 | 0.000* |
| Estadístico Jarque-Bera | 188.8160 | 0.000* |

*Estadísticamente significativo al 0.05
*Statistically significant at 0.05

Los resultados para el modelo ajustado demostraron que las variables explicativas tuvieron una estrecha relación con la variable dependiente, ya que se registró una R² ajustada mayor a 0.9 y un valor de -122998 para el criterio de información de Akaike (AIC), para este caso, los valores bajos indicaron que el modelo explicó de forma satisfactoria la relación entre variables.

Los estadísticos *F-Static* y *Wald Static* señalaron la relevancia total del modelo, el cual es estadísticamente significativa; mientras que, el estadístico Jarque-Bera muestra la distribución normal de los residuales. 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.

Modelado dinámico

A través de la modelación dinámica, en el sitio 192.168.10.38:8080/apps/editor, perteneciente a la intranet de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Juárez del Estado de Durango (UJED), se presenta el resultado

Dynamic modeling

Through dynamic modeling, in the site 192.168.10.38:8080/apps/editor, which belongs to the intranet of the Forest Science School of Juárez University at Durango State (Facultad de Ciencias Forestales of the Universidad Juárez del Estado de Durango) (UJED, for its acronym in Spanish), the result is presented through a friendly simple interface, where the user can interactively enter the components previously evaluated under a spatial and temporal variation.

Moreover, Figure 3 shows a preliminary comparison of the goodness of fit between the causality index and that related to the wildfire history.

These results are consistent with those obtained in diverse studies, particularly in terms of the causes of wildfires (Ávila-Flores *et al.*, 2010b; Muñoz *et al.*, 2005; Rodríguez *et al.*, 2008; Meza and Sepúlveda, 2009). However, none of these include a technological platform that integrates the variables in a wholesome spatial and temporal model.

mediante una interfaz amigable y sencilla; donde el usuario puede ingresar de forma interactiva los componentes evaluados con anterioridad bajo una variación espacial y temporal.

Así mismo, de manera preliminar, en la Figura 3 se observa una comparación de la bondad de ajuste entre el índice de causalidad y el relativo al historial de incendios.

Although the findings reported here are incipient and still require further research, the relevance of simulating both optimistic and pessimistic probable scenarios, in terms of the specific weight of each variable, stands out. The applications can be transcendental in the dynamic of wildfires over ecosystems (global climate change) and represent valuable information, which is not obvious in the field or is not identifiable at first sight.

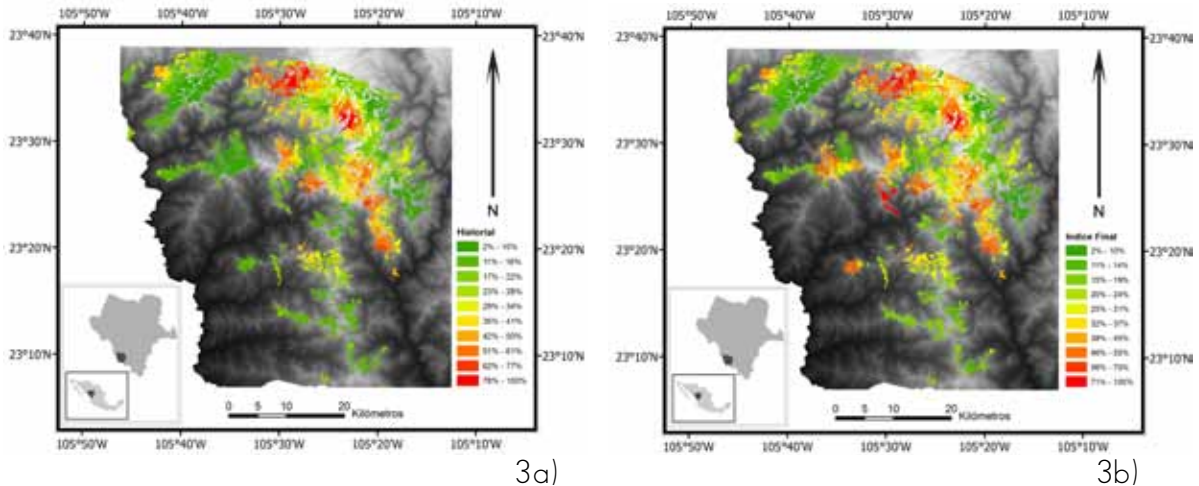


Figura 3. Comparación cartográfica de la bondad de ajuste de las áreas quemadas con recurrencia (3a) y el modelo conceptual generado (3b).

Figure 3. Cartographic comparison of the goodness to fit of recurrently burned areas (3a) and the generated conceptual model (3b).

Estos resultados son congruentes con los obtenidos en diversos estudios, particularmente, en lo referido a las causales de la ocurrencia del fuego (Ávila-Flores *et al.*, 2010b; Muñoz *et al.*, 2005; Rodríguez *et al.*, 2008; Meza y Sepúlveda, 2009). No obstante, ninguno incluye una plataforma tecnológica que integre las variables en un modelo global de índole espacial y temporal.

Si bien, los hallazgos aquí documentados son incipientes y todavía se requiere una mayor investigación, ya se distingue la pertinencia de simular escenarios probables, pesimistas y optimistas, en función del peso específico de cada variable. Las aplicaciones pueden ser trascendentales en la dinámica del fuego sobre los ecosistemas (cambio climático global) y representan información valiosa, que en el campo no es obvia, ni detectada a simple vista. Por lo demás, esto brinda apoyo a los manejadores del bosque para definir dónde podrían ocurrir los incendios forestales, y con ello alistar los planes de prevención y supresión. En cuanto al impacto económico, se acortan de manera significativa las inversiones de tiempo y dinero para los organismos encargados del manejo del fuego.

Moreover, this helps forest handlers define where wildfires may occur, and thus make prevention and extinguishment plans. In terms of economic impact, time and money invested in institutions in charge of handling wildfires are significantly reduced.


The conceptual model that was formulated has the statistical strength to determine the vulnerability of wildfires, by means of its integration through topographical, causal, meteorological and fuel components. Its implementation through the developed platform constitutes a relevant and state-of-the-art technological contribution to the modeling of wildfires for the state of Durango.

This effort needs to be complemented with subsequent researches that configure specific models, according to local adaptations. Moreover, it is necessary to validate it on handling units that were not included in the pilot area, since such comparison will help observe the coincidences and discrepancies, in order to extend it to the rest of the ecosystems found in the state of Durango.

El modelo conceptual generado presenta una solidez estadística para determinar la vulnerabilidad de los incendios, mediante su integración a partir de componentes topográficos, causales, meteorológicos y de combustibles. Su implementación a través de



la plataforma desarrollada, constituye un aporte tecnológico relevante y vanguardista en el modelaje de los incendios forestales para Durango.

Este esfuerzo debe complementarse con investigaciones subsecuentes, que configuren modelos específicos de acuerdo a las adaptaciones locales. Así mismo, es necesaria su validación sobre unidades de manejo no consideradas en el área piloto, pues dicha comparación permitirá observar coincidencias y discrepancias para hacerlo extensivo al resto de los ecosistemas del estado. 

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se realizó dentro del marco de movilidad internacional para docentes apoyado por el CUMEX y la UJED. También se agradece a CONAFOR y al Ejido Pueblo Nuevo por la disposición de datos, así como al COCYTED por el financiamiento del proyecto DGO-2010-C02-144340. Adicionalmente se reconoce el apoyo del ISIMA en el proceso de publicación y el aporte técnico de Sergio Daniel Martínez T. y Alfredo Hernández G.

REFERENCIAS

- Ávila-Flores, D. Y., M. Pompa-García y E. Vargas-Pérez. 2010a. Análisis espacial de la ocurrencia de incendios forestales en el estado de Durango. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 16 (2):253-260.
- Ávila-Flores, D. Y., M. Pompa-García, X. Antonio-Nemiga, X. Rodríguez-Trejo, D. Vargas-Pérez and J. Santillán-Pérez. 2010b. Driving factors for forest fire occurrence in Durango State of Mexico: A geospatial perspective. *Chinese Geographical Science*. 20:6-491.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2010. Reporte semanal de incendios forestales. Gerencia estatal Durango. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/10/1479Reporte%20semanal%202011.pdf>. (17 de febrero de 2012).
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). 2008. ArcMap (9.3). Redlands, CA, USA. s/p.
- Getis, A. and J. K. Ord. 1992. The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics. *Geographical Analysis*. 24: 189-206.
- Maeda, E. E., G. F. B. Arcoverde, P. K. E. Pellikka and Y. E. Shimabukoro. 2011. Fire risk assessment in the Brazilian Amazon using Modis imagery and change vector analysis. *Appl. Geography* 31(1): 76-84.
- Meraz, A., R. 1998. Programa de manejo forestal ciclo de corta. 1997-2007.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was carried out as part of the international mobility framework for professors, supported by CUMEX and UJED. We would also like to thank CONAFOR and the Ejido Pueblo Nuevo for providing data, as well as COCYTED for granting funds for project DGO-2010-C02-144340. Moreover, we acknowledge the support given by ISIMA during the publication process, as well as the technical support provided by Sergio Daniel Martínez T. and Alfredo Hernández G.

End of the English version



- Servicio Técnicos Forestales del Ejido Forestal Pueblo Nuevo. Pueblo Nuevo, Dgo. México. 215 p.
- Meza S., R. y J. Sepúlveda B. 2009. Caracterización del terreno y su influencia en los incendios forestales en Baja California, México. INIFAP. La Paz, B. C. México. www.mappinginteractivo.com/plantilla-eggeo.asp?idarticulo=1603 (17 de febrero de 2012).
- Muñoz R., C. A., E. J. Treviño G., J. Verástegui Ch., J. Jiménez P. y O. A. Aguirre C. 2005. Desarrollo de un modelo espacial para la evaluación del peligro de incendios forestales en la Sierra Madre Oriental de México. *Investigaciones Geográficas*. 56: 101-117.
- Pompa G., M. 2012. Sistema de información geográfica de los ecosistemas de Durango. Mapa de climas. <http://www.ujed.mx/sigeed/Inicio.aspx>. (17 de febrero de 2012).
- 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.