



Artículo / Article

Cambio climático y predicción de incendios al 2050 en el Bosque La Primavera, Jalisco

Climate change and prediction of fires for the year 2050 at the La Primavera Forest, Jalisco

José Luis Ibarra Montoya¹ y Francisco Martín Huerta Martínez¹

Resumen

Durante las últimas dos décadas, los incendios se han incrementado en frecuencia e intensidad en diversas partes del mundo. Las principales causas de estos patrones se asocian, tanto a las actividades de uso de suelo como a los cambios en el clima. El Bosque La Primavera es un área natural protegida de gran importancia, por su cercanía a la ciudad de Guadalajara; de tal suerte que la predicción de incendios es de gran interés, ya que la frecuencia e intensidad de los mismos son una fuerte causa de deterioro de la zona. El objetivo de este trabajo fue construir un modelo espacial para generar un escenario de predicción de incendios para el año 2050 en el Bosque La Primavera, para ello se tomaron como referencia los datos de las proyecciones climáticas para el occidente de México y las ocurrencias históricas de incendios de los últimos años. El modelo predice un área de incendios que cubre casi la totalidad del polígono del área protegida. El mayor efecto del cambio climático en la zona está asociado a la disminución de las precipitaciones y a un aumento en la temperatura, lo cual incide en un incremento del área afectada por los incendios. Bajo ese escenario, el principal desafío será definir, acertadamente, las políticas públicas y estrategias de mitigación, con la finalidad de promover que el Bosque La Primavera sea más saludable, en términos de conservación, productividad, diversidad y resiliencia, lo que asegurará una provisión continua de servicios ecosistémicos bajo un clima cambiante.

Palabras clave: Degradación ambiental, escenarios futuros, MaxEnt, Modelo espacial, SIG, uso de suelo.

Abstract

During the last two decades, forest fires have increased in frequency and intensity in various parts of the world. The main causes of these patterns are associated both with land-use activities and with climate change. The *La Primavera* Forest is a highly important natural reserve due to its proximity to the city of *Guadalajara*; therefore, the prediction of fires is of great interest, as the frequency and intensity of forest fires are a major cause of deterioration of the area. The objective of this work was to build a spatial model in order to generate a fire prediction scenario for the year 2050 in the *La Primavera* Forest, for which purpose the data of climate projections for western Mexico and the historical occurrences of fires in the last few years were taken as a reference. The model predicts a fire zone that covers the protected area almost in its entirety. The most prominent effect of climate change in the area is associated to the reduction of precipitations and to an increase in the temperature, which results in an increase of the surface area affected by the fires. Under this scenario, the main challenge would be to aptly define the mitigation policies and strategies for promoting a healthier *La Primavera* Forest in terms of conservation, productivity, diversity and resilience, which will ensure the ongoing provision of ecosystemic services under a changing climate.

Key words: Environmental degradation, future scenarios, MaxEnt, Spatial model, GIS, land use.

Fecha de recepción/Reception date: 2 de septiembre de 2015 ;Fecha de aceptación/Acceptance date: 7 de diciembre de 2016.

¹ Departamento de Ecología, Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Guadalajara, México. Correo-e: fhuerta@cucba.udg.mx

Introducción

Durante las últimas dos décadas los incendios han aumentado en frecuencia e intensidad en diversas partes del mundo; en Europa, entre 1980 y 2009 alcanzaron en promedio de 480 000 ha por año, y 50 000 ocurrencias. Portugal tiene la densidad de incendios y la mayor área relativa de todos los países del sur de Europa. En consecuencia, los incendios se posicionan como el más importante de todos los problemas relacionados con bosques, ya que afectan el paisaje, la vegetación, suelos y la calidad del aire (Nunes *et al.*, 2016).

En Canadá, diversos estudios anticipan un profundo impacto del cambio climático en la frecuencia, extensión y severidad de los incendios en los bosques boreales (Bergeron *et al.*, 2004). En Estados Unidos de América, el área forestal afectada por el fuego crecido seis veces (Mann y Kump, 2009). El aumento repentino y marcado de la frecuencia y duración de incendios de gran magnitud se asocia a un cambio abrupto hacia las primaveras inusualmente cálidas, reducidas de precipitación invernal, derretimiento temprano de la nieve en primavera así como veranos más secos y prolongados (Westerling *et al.*, 2006); mientras que en el territorio nacional, se anticipa un incremento de los incendios relacionado con las variaciones climáticas extremas (Dryry y Veblen, 2008; Pompa-García y Sensibaugh, 2014).

En México, se estima que la siguiente temporada alta de incendios forestales podría iniciar con el próximo mínimo solar, el cual tendrá lugar entre los años 2017 y 2019 (Velasco-Herrera, 2016). Además, en la región occidente se predice una disminución en las precipitaciones hasta de 10 % y un incremento en las temperaturas de 2 a 4 °C, en el escenario de cambio climático más severo (Durán, 2010; Ibarra-Montoya *et al.*, 2011).

El Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera (APFFLP), conocida localmente como Bosque La Primavera, es una de las áreas protegidas más importantes del occidente del país. Por su cercanía con la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) constituye el principal "pulmón" natural para esta gran ciudad, por lo que representa un reto para la ciencia en el contexto de la predicción de incendios, ya que la frecuencia e intensidad de los mismos son una fuerte causa de deterioro de esta zona, en la cual, desde 1949 a la fecha, se presenta un promedio de cinco conflagraciones por año (Semarnat, 2000).

La época del año de mayor intensidad coincide con la de anidación y reproducción de algunas aves y mamíferos, los cuales abandonan sus crías, nidos o madrigueras, o bien perecen víctimas del humo y las llamas.

La producción de la caña de azúcar implica el uso periódico del fuego, que destruye no solo las hojas del cultivo durante la

Introduction

During the last two decades, forest fires have increased in frequency and intensity in various parts of the world. Between 1980 and 2009, there were 50 000 occurrences of fires in Europe, covering an average of 480 000 ha per year. Portugal has the highest fire density and the largest relative area of all the countries in southern Europe. Therefore, fires are the most important issue related to the forests, as they affect the landscape, the vegetation, the soil and the quality of the air (Nunes *et al.*, 2016).

In Canada, various studies predict a profound impact of climate change on the frequency, extension and severity of fires in northern forests (Bergeron *et al.*, 2004). In the United States of America, the forest area affected by fires has increased six-fold (Mann and Kump, 2009). The marked, sudden increase in the frequency and duration of large forest fires is associated to an abrupt change toward unusually warm springs, reduced winter precipitations, early melting of snow in the spring, and drier, longer summers (Westerling *et al.*, 2006), while an increase of forest fires is predicted in Mexico as a result of extreme climatic variations (Dryry and Veblen, 2008; Pompa-García and Sensibaugh, 2014).

In Mexico, the next high forest fire season is predicted to begin with the next solar minimum, which will occur between 2017 and 2019 (Velasco-Herrera, 2016). Furthermore, it is estimated that precipitations will decrease by up to 10 % and temperatures will increase by 2 to 4 °C in the western region, under the harshest climate change scenario (Durán, 2010; Ibarra-Montoya *et al.*, 2011).

At the *La Primavera* Wildlife Conservation Area (APFFLP, Spanish acronym), locally known as *Bosque La Primavera*, is one of the main protected areas in western Mexico. Due to its proximity to the Metropolitan Area of *Guadalajara* (ZMG, Spanish acronym), it is the main natural "lung" for this large city, and therefore poses a challenge for science within the context of the prediction of fires, as the frequency and intensity of these is a major cause of the deterioration of this area, where an average of five forest fires per year have occurred since 1949 (Semarnat, 2000).

The time of the year with the most intense fires coincides with the nesting and reproduction season of certain birds and mammals that abandon their offspring, their nests or their lairs, or perish due to the smoke and the flames.

Sugar cane production entails the periodical use of fire, which destroys not only the leaves of the crop during the harvest but also, very frequently, all of the surrounding vegetation. The surface areas planted with sugar cane increase every year, and this in turn increases the frequency of forest fires (Semarnat, 2000).

zafra, sino también, y con mucha frecuencia, toda la vegetación que lo rodea. Las superficies con caña aumentan cada año y, con ello, la frecuencia de incendios forestales (Semarnat, 2000).

Si se logra generar un modelo predictivo de incendios, las acciones de prevención deberán ser más eficientes, aun con los limitados recursos económicos con los que se cuenta en dicha área protegida. Huerta-Martínez e Ibarra-Montoya (2014) describen espacial y temporalmente la historia de un periodo de 15 años de incendios en esa área, y señalan como siendo los años críticos a 1984, 1987, 1995, 1998, 2005 y 2012, tanto por la superficie afectada como por su intensidad; en el último año se afectaron 7 744 ha. Datos del Gobierno del estado de Jalisco indican que entre 10 a 20 % del arbolado murió como consecuencia del fuego (Huerta-Martínez e Ibarra-Montoya, 2014), sin embargo no existen estimaciones de las emisiones de CO₂ por causa de estos siniestros. Por otro lado, los datos sugieren una relación estrecha con las variaciones climáticas extremas, específicamente el fenómeno del Niño (Huerta-Martínez e Ibarra-Montoya, 2014).

Con base en lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue construir un modelo espacial para generar un escenario de predicción de incendios para el año 2040 en el APFFLP, a partir de los datos de las proyecciones climáticas para el occidente de México publicadas por Durán (2010) y las ocurrencias históricas de incendios descritas en Huerta-Martínez e Ibarra-Montoya (2014), con la finalidad de contribuir con información que apoye la toma de decisiones en materia de protección de esta área natural protegida.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El APFFLP se ubica en la región central del estado de Jalisco, México, entre las coordenadas extremas 103°28' a 103°42' de longitud oeste y 20°32' a 20°44' de latitud norte (Figura 1). El APFFLP tiene alrededor de 22 puntos de acceso, mediante caminos de terracería y brechas, tres de los cuales se utilizan principalmente con fines recreativos. Según la clasificación climática de Köppen, modificada por García (1987), los climas predominantes son el templado subhúmedo C (w₁)(w) y semicálido subhúmedo (A) C (w₁)(w). La temperatura media anual es de 20.6 °C, enero el mes más frío y junio el más cálido. El promedio anual de humedad es de 63 %; los vientos dominantes provienen del suroeste, con una velocidad máxima de 53 km h⁻¹ (Semarnat, 2000).

If a predictive model for fires is developed, preventive actions are bound to become more effective, even with the limited financial resources available in that protected area. Huerta-Martínez and Ibarra-Montoya (2014) provide a spatial and temporal description of a 15-year period of fires in that area and highlight the years 1984, 1987, 1995, 1998, 2005 and 2012 as critical, not only for their intensity but also for the surface area affected by them; in the last year, 7 744 ha were affected. Data provided by the Government of the State of Jalisco point out that between 10 and 20 % of the trees died as a consequence of fires (Huerta-Martínez and Ibarra-Montoya, 2014). However, no estimations of CO₂ emissions due to these phenomena exist. On the other hand, the data suggest a close relationship with extreme climatic variations, specifically with the *El Niño* phenomenon (Huerta-Martínez and Ibarra-Montoya, 2014).

Thus, the objective of the present work was to build a spatial model in order to develop a fire prediction scenario for the year 2040 at APFFLP based on the data of the climatic projections for western Mexico published by Durán (2010) and the historical occurrences of fires described by Huerta-Martínez and Ibarra-Montoya (2014), in order to contribute information to support decision-making processes in regard to the protection of this natural reserve.

Materials and Methods

Study area

APFFLP is located in the central region of the State of Jalisco, Mexico, between the extreme coordinates 103°28' to 103°42' W and 20°32' to 20°44' N (Figure 1). APFFLP has approximately 22 points of access through dirt roads and paths, three of which are used mainly for recreational purposes. According to Köppen's climate classification modified by García (1987), the predominant climates are temperate subhumid C (w₁)(w) and semi-warm subhumid (A) C (w₁)(w). The mean annual temperature is 20.6 °C, January being the coldest month, and June, the warmest. The mean annual humidity is 63 %; the predominant winds come from the southwest and reach a maximum speed of 53 km h⁻¹ (Semarnat, 2000).





Figura 1. Ubicación geográfica del APFFLP en Jalisco, México.
 Figure 1. Geographic location of APFFLP in Jalisco, Mexico.

La vegetación se caracteriza principalmente por bosque de encino, bosque de encino-pino, bosque de pino, bosque tropical caducifolio, así como pastizal inducido (Semarnat, 2000).

The main vegetation consists of oak, pine-oak and pine forests, tropical deciduous rainforests and induced grasslands (Semarnat, 2000).

Generación de un escenario predictivo de incendios en el contexto de Cambio Climático

Development of a fire prediction scenario within the context of Climate Change

Se utilizaron los datos mensuales y anuales de precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima y temperatura media de los periodos 1961-1990 (climatología de referencia) y 2041-2060, para determinar las áreas potenciales de incendiarse en el Bosque La Primavera para el año 2050. Estos datos climáticos se obtuvieron del portal de datos de *Earth System Grid* (ESG) de *WorldClim* (Worldclim, 2015) y se trabajaron mediante coberturas en formato *raster*, con una resolución de 30 segundos de arco, en el sistema *Idrisi Selva* (Eastman, 2012). Para el periodo 2014-2060 se consideraron los modelos de circulación general (MCG)

Monthly and annual precipitation and maximum, minimum and mean temperature data for the years 1961-1990 (reference climatology) and 2041-2060 were used to determine the areas that might potentially catch fire at the *La Primavera* Forest by the year 2050. These climate data were taken from the *Earth System Grid* (ESG) database of *WorldClim* (Worldclim, 2015) and were worked in 30 arcseconds raster images, in the *Idrisi Selva* system (Eastman, 2012). For the 2014-2060 period, the general circulation models (GCMs) HadGEM2-AO (Hadley) and MIROC5 (Miroc) were considered, under two of the four scenarios outlined by the IPCC, which assume different levels

HadGEM2-AO (Hadley) y MIROC5 (Miroc), bajo dos de los cuatro escenarios planteados por el IPCC, los cuales asumen diferentes niveles de esfuerzo de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel global (rcp45 y rcp60).

Estos escenarios forman parte de la modelación del clima desarrollado por el proyecto de intercomparación de modelos acoplados fase 5 *Coupled Model Intercomparison Project*, CMIP5 por sus siglas en Inglés) (<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>) (Taylor et al., 2012). Los rcp se refieren al forzamiento radiativo expresado en $W m^{-2}$; y se asume que éste varía al incrementar los GEI. El rcp45 asume un forzamiento radiativo de $\approx 4.5 W m^{-2}$ y que las emisiones de GEI llegarán a la cúspide alrededor del año 2040 para después disminuir. La temperatura muy probablemente excede los $2^{\circ}C$; en tanto que el rcp60 considera parte de un forzamiento radiativo de $\approx 6 W m^{-2}$ con emisiones que llegarán a la cima alrededor del año 2080, además de la aplicación de tecnologías y estrategias de reducción de GEI. El total de las variables utilizadas se describen en el Cuadro 1.

of efforts to reduce greenhouse gas (GHG) emissions globally (rcp45 and rcp60).

These scenarios are part of the climate modeling developed by the Coupled Model Intercomparison Project, Phase 5 (CMIP5) (<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>) (Taylor et al., 2012). The rcps refer to the radiative forcing expressed in $W m^{-2}$; furthermore, it is assumed that this varies with increased GHG. RCP45 assumes a radiative forcing of $\approx 4.5 W m^{-2}$ and that GHG emissions will reach a peak around the year 2040, after which they will diminish. Most probably, the temperature will exceed $2^{\circ}C$; while RCP60 considers part of a radiative forcing of $\approx 6 W m^{-2}$ with emissions that will reach the peak around the year 2080, besides the application of GHG-reducing technologies and strategies. Table 1 describes the total variables utilized.



Cuadro 1. Variables de tipo climático consideradas en la generación del modelo predictivo de incendios en el Bosque La Primavera al 2050.

Variable	Unidades
Precipitación acumulada promedio anual	mm
Precipitación acumulada promedio junio-octubre	mm
Precipitación acumulada promedio noviembre-abril	mm
Precipitación del mes más húmedo	mm
Temperatura media anual	$^{\circ}C$
Temperatura media mayo-octubre	$^{\circ}C$
Temperatura media noviembre-abril	$^{\circ}C$
Temperatura mínima media anual	$^{\circ}C$
Temperatura mínima media mayo-octubre	$^{\circ}C$
Temperatura mínima media noviembre-abril	$^{\circ}C$
Temperatura máxima media anual	$^{\circ}C$
Temperatura máxima media mayo-octubre	$^{\circ}C$
Temperatura máxima media noviembre-abril	$^{\circ}C$
Temperatura media del mes más frío	$^{\circ}C$
Temperatura mínima media del mes más frío	$^{\circ}C$
Temperatura media del mes más húmedo	$^{\circ}C$
Temperatura máxima media del mes más cálido	$^{\circ}C$
Oscilación térmica mayo-octubre	$^{\circ}C$
Fotoperiodo promedio mayo-octubre	h

Table 1. Climatic variables considered in the development of a fire prediction model for the year 2050 at the *La Primavera* Forest.

Variable	Units
Mean annual accumulated precipitation	mm
Mean accumulated precipitation in June-October	mm
Mean accumulated precipitation in November-April	mm
Precipitation during the most humid month	mm
Mean annual temperature	°C
Mean temperature in May-October	°C
Mean temperature in November-April	°C
Minimum mean annual temperature	°C
Minimum mean temperature in May-October	°C
Minimum mean temperature in November-April	°C
Maximum mean annual temperature	°C
Maximum mean temperature in May-October	°C
Maximum mean temperature in November-April	°C
Mean temperature in the coldest month	°C
Minimum mean temperature in the coldest month	°C
Mean temperature in the most humid month	°C
Maximum mean temperature in the warmest month	°C
Thermal oscillation in May-October	°C
Mean photoperiod in May-October	h

Para la construcción del escenario predictivo, se generó un modelo espacial con el enfoque de máxima entropía, versión 3.33k (Maxent). El algoritmo de este sistema fue adaptado por Steven J. Phillips y colaboradores (Phillips y Dudik, 2008; Phillips *et al.*, 2006) para la construcción de modelos de distribución potencial.

De forma general, el algoritmo detecta las relaciones no aleatorias entre dos conjuntos de datos: a) los registros georreferenciados de la presencia de incendios, y b) un conjunto de coberturas, formatos *raster*, de datos digitales que representan las variables climáticas pertinentes para determinar las zonas potenciales de ocurrencia de incendios, a una escala particular de análisis (Pearson y Dawson, 2003; Phillips *et al.*, 2006). El sistema MaxEnt modela la distribución de las ocurrencias de incendios usando solamente datos de presencia de eventos históricos; la distribución de un incendio se representa con una función de probabilidad *P* sobre un conjunto *X* de sitios en el área de estudio.

Se construye un modelo de *P* mediante conjunto de restricciones derivado de datos históricos de presencia de incendios. Las restricciones se expresan como funciones simples de variables climáticas conocidas. El algoritmo de MaxEnt

In order to build the predictive scenario, a spatial model with a maximum entropy, version 3.33k (MaxEnt) was generated. The algorithm of this system was adapted by Steven J. Phillips and his colleagues (Phillips and Dudik, 2008; Phillips *et al.*, 2006) for the construction of potential distribution models.

In general, the algorithm detects the non-random relationships between two sets of data: a) the georeferenced records of the occurrence of fires, and b) a set of coverages, raster images, digital data representing those climatic variables that are relevant for determining the potential areas where fires may occur, at a particular analysis scale (Pearson and Dawson, 2003; Phillips *et al.*, 2006). The MaxEnt system models the distribution of fire occurrences using only data on historical events; the distribution of a fire is represented with a probability function *P* divided by a set of sites *X* in the study area.

A model of *P* is built with a set of restrictions derived from historical data of the occurrence of fires. The restrictions are expressed as simple functions of known climatic variables. The MaxEnt algorithm forces the mean of each function of each variable to approach the actual mean of the variable in those areas where fires occur. Out of all the possible combinations

obliga a que la media de cada función de cada variable se aproxime a la media real de la variable en las áreas de presencia de incendios. De todas las posibles combinaciones de funciones, se selecciona la que logra minimizar la función de entropía, la cual es medida con el índice de Shannon.

La expresión general de la función de probabilidad para i variables climáticas es:

$$P(x) = e^{\lambda \cdot f(x)} / Z \lambda$$

Donde:

- $P(x)$ = Función de probabilidad
- λ = Vector de coeficientes de ponderación
- f = Vector correspondiente de funciones de variables climáticas
- Z = Constante de normalización para asegurar que $P(x)$ equivale a la unidad.

Los valores $P(x)$ obtenidos, representan valores de idoneidad relativa para la presencia de incendios, y constituyen, entonces, la base de un modelo de incendios potenciales.

Para alimentar el modelo se utilizaron, por un lado, los datos de las ocurrencias de eventos de interés del periodo comprendido entre los años 1998-2012 en el APFFLP, proporcionadas por el Departamento de Investigación de la desaparecida Dirección Ejecutiva del Bosque La Primavera, hoy Organismo Público Descentralizado (OPD) "Bosque La Primavera", y por otro lado, las variables climáticas proyectadas para el año 2050. En la modelación MaxEnt 75 % de los registros de ocurrencia se utilizaron como puntos de entrenamiento y 25 % como puntos de validación. Se usó un umbral de convergencia de 10^{-5} con 1 000 iteraciones, como un límite superior para cada corrida. Para estimar la capacidad de predicción del modelo, se analizó el área bajo la curva (AUC), salida gráfica en la que se observa la capacidad de discriminación de una ocurrencia (sensibilidad) *versus* la capacidad de discriminación de una ausencia (especificidad) (Moreno *et al.*, 2011). El formato de salida analizado fue el acumulativo (intervalo de 0 a 100), el cual indica una idoneidad de área por incendiarse relativa para cada pixel, más una probabilidad de ocurrencia del incendio (salida logística).

Dado que el modelo (por ser no determinístico) produce resultados de alguna manera diferentes de una corrida a la siguiente, aun cuando se emplee la misma entrada de datos, adecuado a la asignación aleatoria del proceso de modelación, se desarrollaron 100 modelos de predicción independientes por cada ocurrencia de análisis, y se eligió un subconjunto de los mejores 10 modelos basado en dos criterios: 1) modelos (20) con menos de 10 % de error por omisión; y 2) de ellos, se seleccionaron los 10 modelos más cercanos a la media en las zonas donde las ocurrencias potenciales fueron predichas (Anderson *et al.*, 2003). Estos 10 modelos se examinaron de manera espacial y se generó un mapa de consenso con valores de pixel de 0 a 10, el 10 representa las áreas en las

de funciones, the one that succeeds in minimizing the entropy function--measured using Shannon's index--is selected.

The general expressions of the function of probability for i climatic variables is:

$$P(x) = e^{\lambda \cdot f(x)} / Z \lambda$$

Where:

- $P(x)$ = Function of probability
- λ = Weighting coefficients vector
- f = Vector corresponding to functions of climatic variables
- Z = Normalization constant to ensure that $P(x)$ is equivalent to the unit.

The $P(x)$ values obtained represent relative suitability values for the occurrence of fires and therefore constitute the base for a model of potential fires.

The model was fed the data of the occurrences of events of interest for the 1998-2012 period at APFFLP, provided by the Department of Research of the extinct Executive Direction of *Bosque La Primavera*--today the "*Bosque La Primavera*" Decentralized Public Agency (DPA)--and, on the other hand, the climatic variables projected for the year 2050. According to the MaxEnt model, 75 % of the occurrence records were utilized as training points, and 25 %, as validation points. A convergence threshold of 10^{-5} with 1 000 iterations was used as the upper limit for each run. The area under the curve (AUC)--a graphical output showing the discrimination capacity of an occurrence (sensitivity) versus the discrimination capacity of an absence (specificity)-- was analyzed in order to estimate the predictive capacity of the model (Moreno *et al.*, 2011). The analyzed output format was cumulative (0 to 100 interval), indicating an area's relative suitability for fires per pixel, plus a probability of occurrence of a fire (logistic output).

Since the model is not deterministic, it produces somewhat different results from one run to another, even with the same data input, adjusted for the random assignation of the modeling process, 100 independent predictive models were developed for each analysis occurrence, and a subset of the 10 best models was selected based on two criteria: 1) models (20) with less than 10 % omission error, and, of these, 2) the 10 models closest to the mean were selected in areas where potential occurrences were predicted (Anderson *et al.*, 2003). These 10 models were examined in spatial terms, and a consensus map was developed using pixel values of 0 to 10, the number 10 representing those areas where all models agree as to the fire occurrence prediction.



que todos los modelos están de acuerdo en la predicción de la ocurrencia de incendios.

Resultados y Discusión

El modelo espacial tuvo una AUC de 0.81, lo que indica que la robustez para clasificar las presencias de los incendios en el APFFLP fue buena (Parolo *et al.*, 2008). La predicción del modelo espacial desarrollado muestra una zona continua que cubre gran parte del polígono del APFFLP (Figura 2) con alta probabilidad de incendiarse bajo las condiciones de mayor sequía y calidez, señaladas como menor humedad (-10% en la precipitación) y temperatura superior (+2 °C).

La construcción del modelo espacial es de las pocas aplicaciones de modelado espacial en el contexto de predicción de zonas potenciales de incendios (Mandallaz y Ye, 1997; García *et al.*, 1999; Muñoz *et al.*, 2005; Pompa-García *et al.*, 2013; Pérez-Verdín, 2013), y es el único hasta el momento que integra variables de CMIP5.

El patrón de área incendiada predicha por el modelo espacial para el año 2050 coincide con la historia de incendios descrita por Huerta-Martínez e Ibarra-Montoya (2014), por ello es posible anticipar que en el APFFLP el cambio climático constituye un escenario de alto riesgo, en el que muy probablemente los incendios serán más frecuentes, más extensos y de mayor intensidad; lo anterior concuerda con lo citado por Bergeron *et al.* (2004), Westerling *et al.* (2006), Mann y Kump (2009), van Mantgem *et al.* (2009) y Allen *et al.* (2010), autores que apuntan a que las características de los incendios forestales están cambiando, debido entre otros factores al cambio climático global.

Results and Discussion

The spatial model had an AUC of 0.81, which is indicative of a good robustness for classifying the occurrences of fires at APFFLP (Parolo *et al.*, 2008). The prediction of the developed spatial model shows a continuous area covering a large portion of the surface area of APFFLP (Figure 2) with a high probability of fire under greater drought and warmth conditions, indicate as a lower humidity (-10% in precipitation) and a higher temperature (+2 °C).

The construction of the spatial model is one of the few applications of spatial modeling within the context of prediction of potential fire areas (Mandallaz and Ye, 1997; García *et al.*, 1999; Muñoz *et al.*, 2005; Pompa-García *et al.*, 2013; Pérez-Verdín, 2013), and so far it is the only model integrating CMIP5 variables.

The pattern of burnt areas predicted by the spatial model for the year 2050 coincides with the history of forest fires described by Huerta-Martínez and Ibarra-Montoya (2014); for this reason, climate change can be predicted to be a high-risk scenario at APFFLP, where fires are likely to become more frequent and more intense and to cover larger areas. This agrees with the predictions quoted by Bergeron *et al.* (2004), Westerling *et al.* (2006), Mann and Kump (2009), van Mantgem *et al.* (2009) and Allen *et al.* (2010), all of whom point out that the characteristics of forest fires are changing, due to global climate change among other factors.

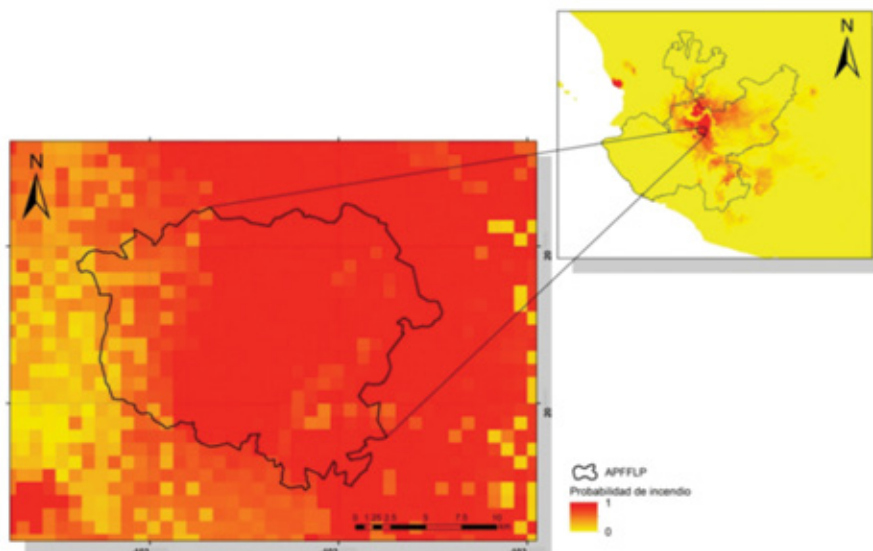


Figura 2. Área potencial de incendios para el año 2050, según lo predicho por el modelo espacial generado.

Figure 2. Potential fire area for the year 2050, as predicted by the generated spatial model.

El APFFLP con frecuencia presenta actividades de cambio en el uso de suelo (Semarnat, 2000), lo cual incide en el aumento de la frecuencia y severidad de los incendios (González *et al.*, 2011). El cambio de uso de suelo es impulsado, sobre todo, para desarrollar cultivos de maíz, agave y caña de azúcar. Además, el incremento de la superficie forestal abandonada, produce un aumento de masas forestales jóvenes, inestables y con poca o nula gestión. A esta situación, se suma la actividad antrópica, responsable de 95 % de los incendios forestales, algunos de ellos intencionales, además del uso cultural del fuego, arraigado en el medio rural.

Cada año, los incendios en el APFFLP originan un gran porcentaje de superficie quemada, con respecto al área total del bosque (Huerta-Martínez e Ibarra-Montoya, 2014); sin embargo, los incendios relacionados con fenómenos meteorológicos extremos, denominados de alta intensidad, tienen un papel destacado, ya que se desarrollan en condiciones de alta temperatura y viento en combinación con baja humedad, por lo que es posible que los siguientes años estas condiciones se repitan con mucha frecuencia.

Entre las principales consecuencias ambientales de los incendios de alta intensidad en el APFFLP sobresalen la reducción de la biodiversidad, aumento de la desertificación (incluso la degradación de los suelos y de la vegetación), contaminación de las aguas subterráneas, así como de la atmósfera; lo cual hace que la recuperación ambiental de las zonas quemadas sea extremadamente complicada y compleja, ya que tras el fuego, el ecosistema es afectado y la fauna debe encontrar un nuevo hábitat natural para sobrevivir, algo complicado ya que el manto vegetal desaparece casi por completo (Weber y Flannigan, 1997; Gitay *et al.*, 2002). Además, después de los incendios intensos, el suelo queda prácticamente estéril, debido a la mineralización de la materia orgánica, lo que limita la recolonización por las especies autóctonas.

Por último, el aumento de la erosión reduce, significativamente, las posibilidades de recuperación (Pompa-García y Sensibaugh, 2014). Asimismo, cuando los incendios son moderados en intensidad son excelentes promotores del repoblamiento natural, tal es el caso particular de *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl., que presenta gran densidad de individuos jóvenes en áreas que presentaron incendios moderados, en un periodo de 5 a 8 años.

Al igual que en otras regiones (Bergeron *et al.*, 2004; Pausas *et al.*, 2008; Mann y Kump, 2009; Conde *et al.*, 2011), el cambio climático en el APFFLP no es teórico y sus efectos comienzan advertirse. Al respecto, el escenario climático proyectado para el 2050 resultó en un incremento en el área afectada por incendios, y serán, particularmente, vulnerables las zonas dominadas por plantaciones y ecosistemas remanentes muy fragmentados, ya que según nuestras observaciones en campo, estos tipos de

Land-use change activities are frequent at APFFLP (Semarnat, 2000); this increases the frequency and severity of forest fires (González *et al.*, 2011). Land-use change is promoted especially for the purpose of planting corn, agave and sugar cane. Furthermore, as larger forest areas are abandoned, young, unstable forest masses with little or no management increase. This situation, together with anthropic activity, accounts for 95 % of forest fires, some of which are intentional, besides the cultural use of fire, deeply ingrained in rural environments.

Each year, fires at APFFLP result in the burning of a large percentage of the total forest surface area (Huerta-Martínez and Ibarra-Montoya, 2014). However, fires related to so-called high-intensity extreme weather phenomena play a major role, since they develop in conditions of high-temperature and wind in combination with low humidity; therefore, these conditions are likely to occur repeatedly and very frequently.

Prominent among the environmental consequences of high-intensity fires at APFFLP are the reduction of biodiversity, increased desertification (including the degradation of soils and vegetation), and pollution of groundwater and of the atmosphere; this renders the environmental recovery of burnt areas extremely difficult and complex as, after the fire, the ecosystem is affected and the fauna must find a new natural habitat in order to survive—a somewhat involved endeavor, as the vegetal mantle disappears almost completely (Weber and Flannigan, 1997; Gitay *et al.*, 2002). Furthermore, after intense fires, the soil becomes virtually sterile due to the mineralization of organic matter, limiting recolonization by native species.

Finally, increased erosion significantly reduces the possibilities of recovery (Pompa-García and Sensibaugh, 2014). Likewise, moderately intense fires are excellent promoters of natural repopulation; such is the case particularly of *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl., of which there is a high density of young individuals in areas where moderate fires occurred within a period of 5 to 8 years.

As in other regions (Bergeron *et al.*, 2004; Pausas *et al.*, 2008; Mann and Kump, 2009; Conde *et al.*, 2011), climate change at APFFLP is not merely theoretical, and its effects are beginning to make themselves felt. In this respect, the climatic scenario projected for 2050 resulted in an increase in the surface area affected by fires, and those areas dominated by plantations and by greatly fragmented remaining ecosystems will be particularly vulnerable, since, according to our in-field observations, these types of forests are invaded by exotic species that generate a large amount of fuel due to their high abundance and spatial distribution, as in the case of *Verbesina* spp.

A major priority for facing the fires predicted to occur at APFFLP is the development of an “adaptation plan” (PACMUN,

bosque están invadidos por especies exóticas que generan una gran cantidad de combustible, debido a sus altas abundancias y distribución espacial, tal es el caso de *Verbesina* spp.

Una de las principales prioridades para hacer frente a los incendios que se predicen en el APFFLP es el desarrollo de un "plan de adaptación" (PACMUN, 2015); entendido como "el ajuste en sistemas naturales o humanos en respuesta a estímulos climáticos reales o esperados y sus efectos, que moderan el daño o explotan oportunidades beneficiosas", entre las que se pueden citar podrían ser: integración de políticas de prevención para la protección de las cuencas contra incendios forestales; mejor gestión de los bosques públicos, considerados como infraestructuras verdes primarias; uso de la biomasa del bosque para energía sin reducir la capacidad de almacenamiento de carbono, como sucede en Italia (Keskitalo *et al.*, 2015), con lo que se reduce el combustible, y por tanto disminuye el riesgo de incendios de gran intensidad; en otras palabras, adoptar un código de buenas prácticas. En este contexto, una opción es la diversificación del bosque, la cual implicaría fomentar el desarrollo y mantenimiento de diversas actividades y usos del territorio dentro del APFFLP; ejemplo: uso agrícola, manejo de bosque nativo, turismo y recreación, así como zonas de exclusión por motivos de restauración. Además de, valorar, en forma adecuada, los servicios ecosistémicos asociados, con la pertinente coordinación entre las instituciones gubernamentales y los dueños de las tierras.

En general, el sector forestal en México y en el mundo está ante un cambio de paradigma en el manejo y prácticas asociadas a las plantaciones productivas de rápido crecimiento. Esto implica importantes desafíos políticos, institucionales y culturales a los cuales, tanto los estados como las empresas tendrán que adaptarse.

Recientes iniciativas internacionales como las definidas por la organización *Forest Stewardship Council* (FSC) son un ejemplo que apunta a promover y normar el buen manejo y sustentabilidad de los bosques y plantaciones. Al respecto, la principal responsabilidad del sector forestal en México radica en promover políticas pertinentes que apunten, en lo general, al ordenamiento del territorio, y en lo particular, a la diversificación del sector forestal, conjuntamente con la tan urgente institucionalidad sectorial, capaz de enfrentar y conducir los desafíos impuestos por el cambio climático y la sociedad. Medidas que constituyen el primer paso para una efectiva adaptación frente al cambio climático, contribuyendo tanto a reducir el riesgo de incendios de alta intensidad como a promover que el APFFLP sea un bosque más saludable, en términos de conservación, productividad, diversidad y resiliencia en el largo plazo. Ibarra-Montoya y Huerta-Martínez (2016) documentaron que de las variables que resultaron con alta importancia en la ocurrencia del fuego para esta zona, la única que puede ser manipulada y controlada por

2015), understood as "the adjustment [carried out] in natural or human systems in response to actual or expected climatic stimuli and their effects, which moderate the damage or exploit beneficial opportunities"; among the latter, we may include: integrating prevention for the protection of basins against forest fires; better management of public forests, considered as primary green infrastructures; use of forest biomass for energy without reducing the carbon storage capacity, as in Italy (Keskitalo *et al.*, 2015), thereby reducing the fuel and, thus, the risk of high-intensity fires; in other words, adopting a good practices code. Within this context, an option is the diversification of the forest, which would imply promoting the development and maintenance of various activities and uses of the territory within the APFFLP, e.g. agricultural use, native forest management, tourism and recreation, and exclusion areas for restoration, as well as adequately assessing the ecosystemic services associated to the relevant coordination between government institutions and landowners.

In general, the forest sector in Mexico and across the world faces a change of paradigm as to the management and practices associated to fast-growing productive plantations. This entails significant political, institutional and cultural challenges to which both states and businesses will have to adapt.

Recent international initiatives, like those defined by the Forest Stewardship Council (FSC), are an example that aims at promoting and regulating the good management and sustainability of forests and plantations. In this regard, the main responsibility of the forest sector in Mexico is to promote relevant policies directed, in general, toward land use planning and, in particular, toward the diversification of the forest sector, as well as to the urgently needed sectorial institutionalidad, with which to face and manage the challenges imposed by society and by climate change. These actions are the first step for an effective adaptation in the face of climate change, for contributing to reduce the risk of high-intensity fires and to promote making APFFLP a healthier forest in terms of conservation, productivity, diversity and long-term resilience. According to Ibarra-Montoya and Huerta-Martínez (2016), the only major variable in the occurrence of fires in this area that can be manipulated and controlled by humans is land use; hence, it is there, that an effect must be sought in order to avoid the occurrence of first-magnitude forest fires like those of the years 1998, 2005 and 2012.

The authors hope that the present study may contribute to promote specific actions by the pertinent authorities to prevent fires, and that the efforts may be oriented toward building a close coordination between the local communities, the authorities and the academic world.

el hombre es el uso de suelo, de tal forma que es en ella en la que se debe incidir a fin de evitar la presencia de incendios forestales de la misma magnitud que los de los años 1998, 2005 y 2012.

Los autores esperan que este estudio pueda ayudar a impulsar acciones preventivas específicas contra los incendios por parte de las autoridades correspondientes, y que los esfuerzos se orienten a construir una estrecha coordinación entre las comunidades locales, autoridades y la academia.

Conclusiones

El modelo espacial desarrollado con MaxEnt, bajo el escenario del cambio climático demostró ser una herramienta confiable para predecir las áreas por incendiarse del APFFLP para el año 2050. De acuerdo al modelo se predice que la mayor parte del polígono tiene altas probabilidades de presentar incendios bajo condiciones de menor precipitación y mayor temperatura, por lo que urge tomar acciones preventivas, más que correctivas, ante este escenario. 🌿

Agradecimientos

Agradecemos a la Biól. Karla Gutiérrez García por su valioso apoyo en la construcción del SIG para el APFFLP; así como en la edición del mapa resultante de la modelación. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo con la beca posdoctoral del Dr. Ibarra-Montoya J. L. con el número: 100395.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Francisco Martín Huerta Martínez: realizó validación de información en campo y acopio en bases de datos específicas y la estructuración del manuscrito; José Luis Ibarra Montoya: realizó revisión del manuscrito, el análisis espacial y la generación del modelo predictivo.

Referencias

- Allen, C. D., A. K. Macalady, H. Chenchouni, D. Bachelet, N. Mc-Dowell, M. Venetier, T. Kitzberger, A. Rigling, D. D. Bres-Hears, E. H. Hogg, P. González, R. Fensham, Z. Zhang, J. Castro, N. Demidova, J. Lim, G. Allard, S. W. Running, A. Semerci and N. Cobb. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management* 259(4): 660-684.
- Anderson, R. P., D. Lew and A. Peterson. 2003. Evaluating predictive models of species distributions: criteria for selecting optimal models. *Ecological Modelling* 162: 211-232.
- Bergeron, Y., M. Flannigan, S. Gauthier, A. Leduc and P. Lefort. 2004. Past, current and future fire frequency in the Canadian boreal forest: Implications for sustainable forest management. *Ambio* 33(6): 356-360.
- Conde, C., F. Estrada, B. Martínez, O. Sánchez y C. Gay. 2011. Regional climate change scenarios for Mexico. *Atmósfera* 24 (1): 125-140.

Conclusions

The spatial model developed under the climate change scenario using MaxEnt proved to be a reliable tool for predicting the areas of APFFLP where forest fires are likely to occur by the year 2050. According to the model, most of the areas have high probabilities of fires under conditions of less precipitation and a higher temperature. Thus, in the face of this scenario, there is a pressing need to develop preventive rather than corrective actions. 🌿

Acknowledgements

We wish to express our gratitude to Biologist Karla Gutiérrez García for her valuable support in building the GIS for APFFLP, as well as for the edition of the map resulting from the modeling. To Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (the National Council for Science and Technology) for its support by providing Dr. Ibarra-Montoya J. L. with a post-doctoral scholarship (No. 100395).

Conflict of interests

The authors declare that they have no conflict of interests.

Contribution by author

Francisco Martín Huerta Martínez: validated the in-field information and collected it in specific databases; he also provided the structure for the manuscript; José Luis Ibarra Montoya: revised the manuscript, carried out the spatial analysis and generated the predictive model.

End of the English version



- Gitay, A., A. Suárez, R. Watson, y J. Dokken. 2002. Cambio climático y biodiversidad. Documento Técnico V del IPCC. Ginebra, Suiza. 85 p.
- González, M., A. Lara, R. Urrutia, y J. Busnich. 2011. Cambio climático y su impacto potencial en la ocurrencia de incendios forestales en la zona centro sur de Chile. *Bosque* 32 (3): 215-219.
- Huerta-Martínez, F. M. y J. L. Ibarra-Montoya. 2014. 15 Años de incendios en el Bosque La Primavera (Jalisco, México): Un acercamiento a sus posibles causas y consecuencias. *CienciaUAT* 8(2): 32-43.
- Ibarra-Montoya, J. L. y F.M. Huerta-Martínez. 2016. Modelado espacial de incendios: una herramienta predictiva para el Bosque La Primavera, Jalisco, México. *Revista Ambiente & Agua* 11(1): 35-49.
- Ibarra-Montoya, J. L., R. Román, K. Gutiérrez, J. Gaxiola, V. Arias and M. Bautista. 2011. Change in land cover and land use in the north of Jalisco, Mexico: An analysis of the future in a context of climate change. *Revista Ambiente & Agua* 6(2): 111-128.
- Keskitalo, E. C. H., M. Legay, M. Marchetti, S. Nocentini and P. Spathef. 2015. The Role of Forestry in National Climate Change Adaptation Policy: Cases from Sweden, Germany, France and Italy. *International Forestry Review* 17(1):30-42.
- Mandallaz, D. and R. Ye. 1997. Prediction of forest fires with Poisson models. *Canadian Journal of Forest Research* 27(10):1685-1694.
- Mann, M. E. and L. R. Kump. 2009. *Dire predictions: understanding global warming*. DK publishing. New York, NY, USA. 208 p.
- Moreno, R., R. Zamora, J. R. Molina, A. Vásquez y M. Herrera. 2011. Predictive modeling of microhabitats for endemic birds south Chilean temperate forest using maximum entropy (Maxent) *Ecological Informatics* 6(6):364-370.
- Muñoz, R., E. Treviño, J. Verástegui, J. Jiménez, y O. Aguirre. 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.
- Nunes, A. N., L. Lourenço and A. C. Castro Meira. 2016. Exploring spatial patterns and drivers of forest fires in Portugal (1980-2014). *Science of the Total Environment* <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.121>. (17 de octubre de 2016).
- Plan de Acción Climática Municipal (PACMUN). 2015. Plan de Acción Climática Municipal. <http://pacmun.org.mx> (23 de mayo de 2015).
- Parolo, G., G. Rossi and A. Ferrarini. 2008. Toward improved species niche modelling: *Arnica montana* in the Alps as a case study. *Journal of Applied Ecology* 45:1410-1418.
- Pausas, J. G., J. Llovet, A. Rodrigo and R. Vallejo. 2008. Are wildfires a disaster in the Mediterranean basin? - A review. *International Journal of Wildland Fire* 17(6): 713-723.
- Pearson, R. G. and T. P. Dawson. 2003. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimatic envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography* 12: 361-371.
- Pérez-Verdín, G., M. Márquez-Linares, A. Cortés-Ortiz y M. Salmerón-Macías. 2013. Análisis espacio-temporal de la ocurrencia de incendios forestales en Durango, México. *Madera y Bosques* 19(2): 37-58.
- Phillips, S. J., R. P. Anderson and R. E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modeling* 190: 231-259.
- Phillips, S. J. and M. Dudik. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* 31:161-175.
- Pompa-García, M., L. Vázquez-Vázquez, M. Zapata-Molina y R. Solís-Moreno. 2013. Modelo conceptual del potencial de incendios forestales en Durango: Avances preliminares. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 3(13): 95-102.
- Pompa-García, M. y M. Sensibaugh. 2014. Ocurrencia de incendios forestales y su teleconexión con fenómenos ENSO. *CienciaUAT*. 27(2): 06-10.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). 2000. Programa de Manejo Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. México, D.F., México. 132 p.
- Taylor, K. E., R. J. Stouffer and G. A. Meehl. 2012. An Overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93(4):485-498.
- van Mantgem, P. J., N. L. Stephenson, J. C. Byrne, L. D. Daniels, J. F. Franklin, P. Z. Fule, M. E. Harmon, A. J. Larson, J. M. Smith, A. H. Taylor and T. T. Veblen. 2009. Widespread Increase of Tree Mortality Rates in the Western United States. *Science* 323 (5913): 521-524.
- Velasco-Herrera, G. 2016. Mexican forest fires and their decadal variations. *Advances in Space Research* 58(10):2104-2115.
- Weber, M. G. and M. D. Flannigan. 1997. Canadian boreal forest ecosystem structure and function in a changing climate: Impacts on fire regimes. *Environmental Reviews* 5(3-4): 145-166.
- Westerling, A. L., H. G. Hidalgo, D. R. Cayan and T. W. Swetnam. 2006. Warming and earlier spring increase western U.S. forest wildfire activity. *Science* 313(5789): 940-943.
- WorldClim. 2015. WorldClim. Global Climate Data. <http://www.worldclim.org> (08 de mayo de 2015).

