UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

"ANÁLISIS DE PELIGRO DE INCENDIOS FORESTALES PARA EL MANEJO DEL FUEGO EN PUEBLA"

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

UNIVERSIDAD AUTONOMA CHAPINGO
MEXICO
DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALE

PRESENTA:

Ing. Rosa Laura Carrillo García

Diciembre 2011

Chapingo, Estado de México

La presente investigación fue financiada por el CONACYT y el proyecto Ajusco de la Universidad Autónoma Chapingo, sobre ecologia del fuego, manejo integral del fuego y restauracion de areas incendiadas.

ANÁLISIS DE PELIGRO DE INCENDIOS FORESTALES PARA EL MANEJO DEL FUEGO EN PUEBLA.

Tesis realizada por **Ing. Rosa Laura Carrillo García** bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

DIRECTOR: **DR. DANTE ARTURO RODRÍGUEZ TREJO**

ASESOR: **DR. HUBERT TCHIKOUÉ**

ASESOR: **M. C. JAVIER SANTILLAN PÉREZ**

ASESOR: **DR. EDUARDO VARGAS PÉREZ**

ANÁLISIS DE PELIGRO DE INCENDIOS FORESTALES PARA EL MANEJO DEL FUEGO EN PUEBLA.

El jurado que revisó y aprobó el examen de grado de **Ing. Rosa Laura Carrillo García** autora de la presente tesis de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales estuvo constituido por:

PRESIDENTE: **DR. DANTE ARTURO RODRÍGUEZ TREJO**

ASESOR: **DR. HUBERT TCHIKOUÉ**

ASESOR: **M. C. JAVIER SANTILLAN PÉREZ**

ASESOR: **DR. EDUARDO VARGAS PÉREZ**

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo proporcionado para realizar mis estudios de Maestria.

A la Universidad Autónoma Chapingo por ofrecerme las herramientas necesarias para mi desarrollo profecional.

Al proyecto Ajusco de la Universidad Autónoma Chapingo

Al Dr. Dante Arturo Rodríguez Trejo por su constante apoyo, dispocisión de tiempo dedicado a la dirección de la tesis.

Al Dr. Hubert Tchikoué, al M.C. Javier Sántillan y al Dr. Eduardo Vargas por las observaciones y sugerencias con las que contribuyeron para enriquecer la investigación plasmada en la tesis.

Un agracecimiento especial a los Doctores Alejandro I. Monterroso Rivas, Alejandro Corona Ambríz y al M. C. Juan Angel Tinoco Rueda por su apoyo, observaciones y sugerencias a la tesis.

A todos, muchas gracias.

DEDICATORIA

A MI FAMILIA QUE HAN ESTADO APOYÁNDOME EN ESTE PROYECTO

A MIS SOBRINOS PARA QUE TENGAN LA MOTIVACIÓN DE TRAZAR SUS PROPIAS METAS Y LOGRARLAS

A MIS AMIGOS PORQUE CUENTO CON ELLOS EN TODO MOMENTO Y

A TI

DIOS

QUE ERES MI FUERZA Y ESTAS EN CADA INSTANTE DE MI VIDA.

DATOS BIOGRAFICOS

La autora nació el 10 de enero de 1982 en Texcoco de Mora, Estado de México. Estudió el nivel preparatoria de 1997 al 2000 en la Universidad Autónoma Chapingo (UACh). Ingresó a la Ingenieria en Recursos Naturales Renovables de la misma Universidad del 2000 al 2004, graduándose como ingeniero. Ha trabajado en los proyectos: **"**Evaluación del Programa Nacional de Prevención y Combate de Incendios Forestales, Ejercicio Fiscal 2003, 2004 y 2006**"** coordinado por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y la UACh, apoyando en procesamiento de información y utilización de sistemas de información geográfica; **"**Actualización de Mapas de Escenarios Climatológicos en la República Mexicana, ante el Cambio Climático y Zonificación Agroecológica de 16 Especies Forestales de Interés para la CONAFOR**"** coordinado por la CONAFOR y la UACh durante el 2006 y 2007, contribuyendo en elaboración de cartografía y modelos de cambio climatico; "Combustibles Forestales, Peligro de Incendio y Áreas Prioritarias de Protección en las Zonas Afectadas por el Huracán Dean", trabajando en procesamiento de información y generación de cartografía de Octubre a Diciembre del 2007. Para el 2008 y 2009, trabajó con "Forestagroambiental, S. A", en la ejecución de Ordenamientos Territoriales Comunitarios, además de elaboración de propuestas para apoyos de PROARBOL convocatoria 2009. En el segundo semestre del 2009 ingreso a la Maestria en Ciencias en Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo.

RESUMEN

La gran mayoría de los incendios ocurridos en el mundo son de origen antrópico, los cuales son provocados principalmente por actividades de cambio de uso del suelo. Se ha investigado formalmente poco al respecto y estas investigaciones no contemplan directamente la influencia del ser humano como variable de peso, por lo que se propuso demostrar que los incendios forestales están relacionados con la influencia humana y las condiciones ambientales y que lo anterior se puede plasmar en un índice de peligro de incendios forestales, considerando también la distribución espacial de los incendios forestales, en el estado de Puebla, México.

Se requirió de información cartográfica asociada a un Sistema de Información Geográfica. El muestreo fue sistemático, con unidades de 10 x 10 km. Posteriormente, se evaluó y construyó un modelo de regresión logística donde las variables significativas fueron: precipitación media anual, exposición del terreno y número de ramales de vías de comunicación, todas con correlación positiva, y número de comunidades rurales con correlación negativa.

El mayor peligro de incendio para Puebla se distribuye en tres zonas: la Sierra Norte de Puebla, el poniente colindando con Tlaxcala, y el sureste colindando con Veracruz, registrándose mayores precipitaciones, mayor número de ramales de vías de comunicación y menor número de comunidades. Esta investigación puede contribuir a la planeación de estrategias de manejo del fuego en el estado de Puebla.

Palabras clave: Índice de peligro, distribución, incendios forestales, influencia, planeación.

ABSTRACT

Most of the forest fires worldwide are caused by men, and many are related to soil use change. However, there is scarce research on this matter, so this work is aimed to demonstrate the human and weather influence on forest fires, as well as to propose a forest fires danger index, including also the spatial distribution of forest fires in the state of Puebla, Mexico.

Cartographic information and data bases information was processed in a Geographic Information System. The sampling was systematic, with sampling units of 10 x 10 km. Trough the processing of such information was obtained a logistic regression model, with the following significant variables: Mean annual precipitation, aspect, number of branches in roads, all of these with a positive correlation, and number of rural communities, with a negative correlation.

The highest forest fire danger for the state of Puebla is distributed in three regions: the Sierra Norte de Puebla, the west (limits with Tlaxcala state) and the southeast (limits with Veracruz state), where there are highest precipitations, number of branches of roads, and low number of rural communities. This work may be helpful for the planning of fire management strategies in the state of Puebla.

Key words: danger index, distribution, forest fire, influence, planning.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 1

2. OBJETIVOS 3

2.1. Objetivo General 3

2.2. Objetivos particulares 3

3. REVISIÓN DE LITERATURA 4

3.1. Conceptos 5

3.1.1. Incendio forestal 5

3.1.2. Índices de peligro o riesgo de incendios forestales 6

3.1.3. Puntos de calor 6

3.1.4. Métodos Multi-variados 8

3.1.5. Análisis de regresión un método multivariado 8

3.1.6. Regresión logística 8

3.1.7. Sistemas de información geográfica 9

3.2. Índices de peligro desarrollados en otros países 11

3.2.1. Estado Unidos 11

3.2.2. Canadá 13

3.2.3. Unión Europea 14

3.2.4. España 15

3.3. Incendios forestales e Índices de Peligro en México 23

4. MATERIALES Y MÉTODOS 30

4.1. Materiales 30

4.2. Métodos 31

4.2.1. Área de estudio 31

4.2.2. Cálculo de intensidad de muestreo 32
4.2.3. Determinación y construcción de variables explicativas y de respuestas 34
4.2.4. Análisis estadístico 35
4.2.4.1. Variables Meteorológicas 36
4.2.4.2. Variables Físicas 37
4.2.4.3. Variables de Uso del suelo 38
4.2.4.4. Variables Sociales 41
4.2.4.5. Variable de respuesta 43
4.2.5. Modelo logístico 43
4.2.6. Construcción del modelo de Peligro de Incendios para Puebla 45
4.2.7. Validación 46
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 47
5.1. Variables Ambientales 47
5.2. Variables Físicas 50
5.3. Variables de Uso del suelo 52
5.4. Variables Sociales 53
5.5. Análisis estadístico 55
5.6. Mapa de Peligro de Incendios Forestales en Puebla. 61
6. CONCLUSIONES 67
7. RECOMENDACIONES 69
8. LITERATURA CITADA 70

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Estadísticas de incendios forestales del 2000 al 2010. 24

Cuadro 2. Variables explicativas analizadas. 35

Cuadro 3. Intervalos para porcentajes de pendientes en Puebla. 38

Cuadro 4. Intervalos para orientaciones en Puebla. 38

Cuadro 5. Clasificación de respuestas observadas y predichas para el modelo. 44

Cuadro 6. Categorías de peligro 45

Cuadro 7. Resultados de Clasificación para construcción del modelo general. 56

Cuadro 8. Resultados para validar el modelo general con datos diferentes. ... 60

Cuadro 9. Superficie con respecto a grados de peligro de incendios forestales para Puebla, México. 63

Cuadro 10. Superficie con respecto a grados de peligro por tipo de vegetación para Puebla, México. 65

Cuadro 11. Porcentaje con respecto a grados de peligro por tipo de vegetación para Puebla, México.***** 66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del Sistema Estadounidense de Peligro de Incendios Forestales (NFDRS). 12

Figura 2. Esquema del Sistema Canadiense de Peligro de Incendios Forestales (CFFDRS). 14

Figura 3. Esquema del Sistema de Peligro de Incendios Forestales propuesto por el JRC (Unión Europea). 15

Figura 4. Esquema del Grado Actual de Peligro de Incendios Forestales (DGCNA). 16

Figura 5. Esquema del sistema básico de predicción del peligro de incendios forestales modificado (Santillán, 1993). 26

Figura 6. Mapa de localización del área de estudio, estado de Puebla, México. 32

Figura 7. Red muestral del estado de Puebla, con unidades de muestreo de 10 x 10 km (10,000 ha). 33

Figura 8. Muestreo sistemático, con 85 unidades muestreadas. 33

Figura 9. Estimación de superficie, fragmentación y perímetro agropecuario. . 40

Figura 10. Estimación de la longitud y ramificación de vías de comunicación. 41

Figura 11. Distribución de comunidades por unidad de muestreo. 42

Figura 12: Temperatura media anual de Puebla, México. 47

Figura 13: Precipitación media anual de Puebla, México. 48

Figura 14. Pendientes del terreno para Puebla, México. 50

Figura 15. Exposiciones del terreno para Puebla, México. 51

Figura 16. Altimetría de Puebla, México. 52

Figura 17. Uso del suelo y vegetación de Puebla, México. 53

Figura 18. Comunidades rurales de Puebla, México. 54

Figura 19. Representación gráfica del modelo logístico general de Puebla para cuatro diferentes precipitaciones medias anuales (Pma). 59

Figura 20: Probabilidad Estimada de Peligro de Incendios Forestales para Puebla. 62

Figura 21: Grado de Peligro de Incendios Forestales para Puebla. 64

1. INTRODUCCIÓN

La gran mayoría de los incendios que ocurren en el mundo son de origen antrópico, estos siniestros son provocados principalmente por actividades de cambio de uso del suelo las cuales contribuyen con los fenómenos de deforestación, sobrepastoreo, erosión, entre otros. Pero hay que reconocer que el fuego es un elemento natural, la vegetación y la fauna lo requieren, y también lo necesita la sociedad rural.

Aún cuando existen avances científicos, como el papel que juega México a nivel internacional en la toma de decisiones en aspectos como el cambio climático global, potencial de captura de carbono y la integración de la sociedad en el manejo del fuego, la información respecto al manejo del fuego se ha enfocado principalmente al estudio de los efectos del fuego en el factor vegetación, por lo que se llega a la conclusión de que la investigación al respecto no es la suficiente (Flores *et al*., 2006).

A través del tiempo, la presencia de incendios es frecuente, pero el estudio de este fenómeno se aumentó por la presencia de catástrofes como la ocurrida en el barranco Mann en agosto de 1949 donde un incendio forestal tomó la vida de 13 combatientes en los Estados Unidos, dando como resultado que el Servicio Forestal cambiara su enfoque para evitar catástrofes por medio de la predicción del peligro de incendios sobre un sitio en particular (Wells, 2008). La presión en

la distribución de los recursos en el combate es importante, ya que en las temporadas de mayor número de incendios forestales se presenta la problemática de que son insuficientes los recursos o estos fueron asignados a lugares que los necesitaban en menor grado, dejando a otros lugares con insuficiencia, dificultando la labor de combate.

La necesidad de predecir la posibilidad de que se presenten incendios forestales, a efecto de estar preparados para su combate, o prevenirlos de ser posible, así como el desempeño de una mejor labor preventiva, para facilitar el combate, reducir los daños por el fuego y con mejor eficiencia en el uso de los recursos humanos, materiales y financieros, y el dar la mejor ubicación a estos últimos, han sido las razones por la que se han desarrollado diversas ayudas, tales como los cuadros o mapas de frecuencia de incendios, los índices de ocurrencia de éstos y los índices de peligro (Rodríguez, 1996).

Por tal motivo, en la actualidad el estado de Puebla se encuentra interesado en realizar investigaciones que contribuyan a establecer zonas en el territorio con diferente probabilidad de ocurrencia de incendios forestales y pronosticar su magnitud, con el objetivo principal de servir como herramienta para la toma de decisiones del manejo del fuego en su territorio.

.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

- Identificar la distribución espacial de los incendios forestales en el estado de Puebla, para proyectar y desplegar cartográficamente su probabilidad de ocurrencia con base en variables ambientales y antrópicas.

2.2. Objetivos particulares

- Identificar las principales variables explicativas de la presencia de incendios forestales en el estado de Puebla para obtener mejores índices de peligro.
- Buscar el modelo estadístico más robusto para describir el comportamiento del fuego en Puebla.
- Representar cartográficamente el índice de peligro de incendios forestales de Puebla para la posterior toma de decisiones en cuanto al manejo del fuego.
- Generar información útil para el manejo del fuego en Puebla.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

La gran mayoría de los incendios que ocurren en el mundo son de origen antrópico, lo que hace que la vegetación se vea sometida con más frecuencia a estos siniestros, rebasándose su tolerancia en diversos casos. El fuego incontrolable es provocado principalmente por el sobrepastoreo, actividades agrícolas y cambio de uso del suelo, contribuyendo a su vez con la deforestación, erosión, reducción de la biodiversidad, contaminación del aire, alteración del régimen hidrológico, pérdida del hábitat para la fauna silvestre y al efecto invernadero con la emisión de humos (Rodríguez, 1996; Chuvieco y Martín, 2004).

Hay que identificar los efectos dañinos del fuego en el ambiente pero también hay que reconocer que es un elemento natural, que la vegetación y la fauna lo requieren, además de que los hallazgos arqueológicos y etnológicos sustentan la teoría de que el fuego ha sido utilizado por el hombre para modificar su ambiente geográfico durante toda la historia (Chuvieco y Martín, 2004) y actualmente le sirve mucho a los pobladores de las zonas rurales como herramienta, por lo que es conveniente cambiar el enfoque actual para manejarlo adecuadamente (Rodríguez, 1996).

Entre los beneficios del manejo del fuego que se identifican está la manutención de la vegetación, reciclaje de nutrientes, creación de un ambiente favorable

para la fauna, reducción del peligro de incendios, favorecimiento de la regeneración natural de especies de árboles adaptados al fuego, manutención de paisajes abiertos que faciliten la realización de actividades recreativas, entre otros (Rodríguez, 1996).

Por todo lo anterior se llevó a cabo esta investigación, para complementarla a continuación se exponen algunos conceptos de relevancia para la misma. Posteriormente se describen los esfuerzos internacional y nacional en la investigación realizados hasta el momento, para formar un panorama general de la situación presente ante el problema de los incendios forestales del estado de Puebla, México.

3.1. Conceptos

3.1.1. Incendio forestal

Se define como el fuego que se propaga, sin control, en un sistema forestal y cuya quema no cumple funciones ni objetivos de gestión, por lo que requiere trabajo de extinción. Se trata de un suceso no deseado en el que se producen una serie de consecuencias económicas y ecológicas calificadas como daños y perjuicios (Martínez, 2004).

La ocurrencia de los incendios forestales está determinada por varias condiciones, tanto ambientales como de carácter socio-económico, y los efectos de cada condición varían dependiendo del ecosistema donde se presenta y la escala en tiempo y espacio (Yang *et al.*, 2007). Los incendios forestales de causalidad humana no son sucesos aleatorios, a menudo se localizan cerca de

núcleos habitados y tienden a seguir patrones estacionales, semanales, e incluso diarios (Martell *et al*., 1987; Todd y Kourtz, 1991).

3.1.2. Índices de peligro o riesgo de incendios forestales

El riesgo de incendios forestales, hace referencia a la probabilidad de que ocurra un incendio en un lugar y momento determinado, bajo la naturaleza e incidencia de los agentes causantes, un agente detonador y la cantidad de hojarasca potencial a la cual un área está expuesta. En este juegan un papel importante las variables relacionadas con la incidencia histórica del fuego. En otros casos de riesgos naturales, este no sólo se define por la probabilidad de que se produzca el evento, sino también por los daños que pueda causar, es decir, la vulnerabilidad de las zonas potencialmente afectadas (Chuvieco y Martín, 2004).

El peligro de incendios forestales expresa la facilidad de ignición, propagación y dificultad de control o extinción, derivados de los factores tanto constantes como variables que intervienen en el incendio, además del daño que causan. Se trata de un índice que de cierta forma, engloba al riesgo de ocurrencia de incendios y al riesgo derivado del combustible disponible (cantidad, tipo, contenido de humedad, etc.) junto a otra serie de factores físico (meteorología y topografía) que intervienen en el incendio (Chuvieco y Martín, 2004).

3.1.3. Puntos de calor

CONABIO define a los puntos de calor como el elemento espacial mínimo de la imagen (pixel) que reporta una temperatura elevada. Para las imágenes diurnas la temperatura mínima considerada es de 42 °C y para las imágenes nocturnas

es de 25 °C (Flores *et al.*, 2006). Esta institución es la encargada de la obtención de información para detectar puntos de calor -incendios forestales potenciales- mediante imágenes de satélite tipo AVHRR-NOAA, MODIS-TERRA y MODIS-AQUA, por lo que cuenta con la primera estación MODIS de Latinoamérica que está funcionando desde el año 2002. Para procesar y analizar estas imágenes se utilizaron algoritmos desarrollados por la NASA (Nacional Aeronautics and Space Administration) y la Universidad de Maryland llamado "Thermal Anomalies-Fires and Biomass Burning-MOD 14" (Jiménez *et al.*, 2007).

Una vez procesadas las imágenes se corre el programa para detección de incendios obteniéndose los puntos de calor de forma general, posteriormente se utilizan las denominadas máscaras correspondientes a: a) nubes; b) límites entre tierra y agua, para evitar reflejos; c) luces estables -calor y luces emitidos por ciudades-, y d) puntos estables: sitios que generan altas temperaturas como minas, plantas de nitrógeno, pozos petroleros, etc. (Jiménez *et al.*, 2007).

Luego de obtener la información de puntos de calor fue corroborada con información de detección mediante los métodos tradicionales y se les pidió a las delegaciones de la entonces Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) información sobre la precisión de los reportes en comparación con lo ocurrido en campo, obteniéndose una gran correlación entre los puntos reportados y los incendios forestales ocurridos (Flores *et al.*, 2006).

3.1.4. Métodos Multi-variados

Los métodos multivariados están relacionados con el análisis de observaciones en varias dimensiones (Zamudio y Alvarado, 2000). Las variables de los datos multivariados no necesariamente tienen que ser del mismo tipo, pueden incluirse variables continuas, discretas y/o dicotómicas (Mardia *et al.*, 1989).

Tomando en cuenta los datos, los estudios multivariados pueden clasificarse desde dos puntos de vista alternativos: los que estudian la relación que existe entre las variables y los que estudian la relación entre los individuos (Zamudio y Alvarado, 2000).

3.1.5. Análisis de regresión un método multivariado

Se conoce como análisis de regresión al método estadístico que permite establecer una relación matemática entre un conjunto de variables independientes (X_1, X_2, …, X_k) y la ocurrencia de un evento como la variable dependiente (Y). Es utilizada fundamentalmente en estudios en los que no se puede controlar por diseño los valores de las variables independientes con el fin de predecir su valor o bien, explicarlo (Moral, 2006). Ejemplos de este método son la regresión lineal simple y la regresión logística, esta ultima de interés en la presente investigación.

3.1.6. Regresión logística

La regresión logística es un modelo estadístico variante de la regresión lineal tradicional, que a partir de las variables explicativas independientes estima la variable dependiente o de siniestralidad -la cual es dicotómica- (Hosmer y Lemeshow, 2000). Las variables usadas en el modelo pueden ser categóricas o

continuas. Las continuas son aquellos niveles que pueden asociarse en una escala numérica, en tanto que las categóricas son niveles que no pueden ordenarse por magnitud, ya que no existe ninguna razón para ordenarlos bajo algún criterio numérico particular. Por otra parte no requiere del principio de normalidad (Agresti, 1990; Infante y Zarate, 2003; Montgomery, 2004)

En la regresión logística, la variable dependiente puede tomar un valor “1” o “0” en cada observación, dependiendo de una condición predeterminada y estos valores son usados en un proceso ajustado a un modelo que predice los valores que son numéricos continuos entre 1 y 0. Este valor predictivo puede ser interpretado como la probabilidad de un evento ocurrido, el valor “0” cuando no han ocurrido cambios, y el valor de “1” cuando éstos se han presentado (Agresti, 1990; Infante y Zarate, 2003; Montgomery, 2004).

Los coeficientes de la ecuación indican los pesos de cada una de las variables en la explicación de la ocurrencia del fuego (Chuvieco y Martín, 2004). Una de las características deseables para el modelo a obtener es que sea lo más sencillo posible. El modelo de regresión logística ha sido utilizado previamente en el análisis de ocurrencia de incendios logrando buenos resultados (Martell *et al.*, 1987; Chou *et al.*, 1993; Cega-García *et al.*, 1993; Carvacho, 1998).

3.1.7. Sistemas de información geográfica

Pueden definirse como bases informatizadas de datos con algún tipo de componente espacial. Esto significa que la información que almacenan está referenciada geográficamente, ya se trate de mapas, estadísticas o datos climáticos sobre un territorio concreto, además de que esta información es

almacenada en forma digital muy eficientemente y se puede aprovechar las posibilidades analíticas de las computadoras (Chuvieco y Martín, 1995).

Goodchild (2000) define a los SIG como una tecnología integradora que une varias disciplinas con el objetivo común del análisis, creación, adquisición, almacenamiento, edición, transformación, visualización, distribución, etc. de información geográfica. En cambio Gómez (2006) lo visualiza como una caja de experimentación, permitiendo al gestor del territorio analizar, trabajar o plantearse diferentes escenarios virtuales de una determinada región, por una parte los que producirían con la ejecución de ciertas políticas o los que ocurrirían siguiendo determinadas tendencias.

El empleo de esta tecnología permite integrar y analizar gran cantidad de información de naturaleza espacial y no espacial, que hasta hace poco era muy difícil hacerlo de manera manual o mediante interpretación visual. Los SIG consisten en cuatro componentes básicos: recopilación de la información de entrada; base de datos geográficos; análisis y modelación de la información y visualización; por último la representación de la información (Bautista *et al.*, 2004).

Los SIG se manifiestan como una herramienta muy apropiada para analizar riesgo de incendios forestales puesto que permiten el análisis espacial de las variables introducidas, así como su integración en un sistema de referencia común. Su utilización facilita la creación, transformación y análisis de conjunto de variables geo-referenciadas a una resolución espacial determinada sobre la totalidad del territorio considerado (Aronnoff, 1989; Phillips y NicKey, 1978).

3.2. Índices de peligro desarrollados en otros países

Entre los estudios realizados en otros países que han tenido como propósito generar índices que ayuden a predecir la ocurrencia de incendios forestales con un margen aceptable de probabilidad, tenemos: el sistema estadounidense de peligro de incendios (NFDRS) en 1978; el sistema canadiense de peligro de incendios forestales (CFFDRS) en 1970; el sistema de peligro de incendios forestales propuesto por Joint Research Centre para la unión europea (EFFRFS) en 1997; el grado actual de peligro de incendios forestales (DGCNA) de España en 1987, los cuales consisten en distintas metodologías y estrategias para determinar el comportamiento del fuego en las distintas condiciones de cada región o país del cual han sido implementadas (Chuvieco y Martín, 2004)

3.2.1. Estado Unidos

La investigación en Estado Unidos generó el NFDRS que está compuesto por varios índices, un índice de ocurrencia por causas humanas y naturales, y un índice de combustión. Conformados a su vez por distintas variables que se consideran de relevancia para la obtención del índice de carga (Figura 1). El índice de carga evalúa la dificultad de control y extinción de los incendios forestales, sin predecir con precisión cual será el comportamiento del fuego, por lo que ofrece una información global del peligro (Chuvieco y Martín, 2004).

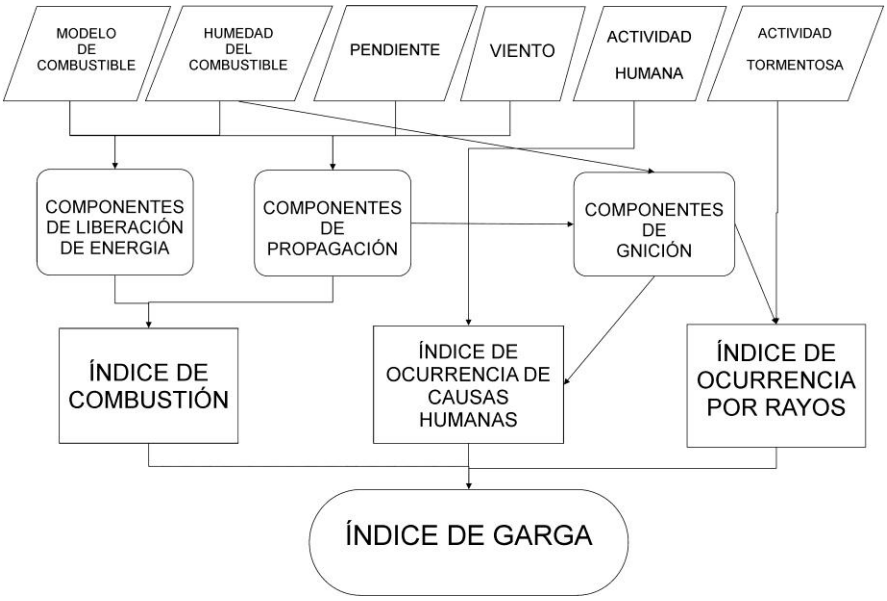


Figura 1. Esquema del Sistema Estadounidense de Peligro de Incendios Forestales (NFDRS).

Cabe destacar que el NFDRS tuvo una actualización en 1988, la cual dio como resultado la generación del índice de severidad estacional en el cual se agregó el índice de Keetch-Byram (1968), cuantificando los efectos de la sequía a largo plazo (Burgan, 1988). En la década del 90 se introdujo la utilización de las imágenes de satélite para el seguimiento del estado de la vegetación (Burgan *et al.*, 1996; Burgan y Hartford, 1993).

En la actualidad, están a disposición del público en varios programas computacionales como el WIMS (Weather Information Management System) y el WFAS (Wildland Fire Assessment System) para la obtención de información meteorológica y el procesamiento del NFDRS, generando mapas diarios, semanales, mensuales y estacionales de peligro para Estados Unidos (Andrews *et al.*, 2008).

En otra investigación realizada en la región oriental de Estado Unidos, se intentó relacionar la distribución espacial de los incendios forestales con la densidad de la población (Donoghue y Main, 1985). Chou *et al.* (1990) encontraron que variables geográficas, como el tipo de vegetación y la cercanía a carreteras o a áreas de acampada, estaban relacionadas con la ocurrencia de incendios forestales en el distrito forestal de San Jacinto, California.

3.2.2. Canadá

Para Canadá se encuentra en vigor el CFFDRS, que comenzó a utilizar en 1970, el cual está conformado por cuatro módulos: el índice meteorológico, el sistema de predicción del comportamiento del fuego, el índice de predicción de la ocurrencia y el sistema accesorio de humedad del combustible esquematizados en la figura 2 (Van Wagner, 1987; Chuvieco y Martín, 2004).

El CFFDRS evalúa el peligro de que se produzca un incendio forestal y las características de la propagación de estos en caso de que sucedan. El Servicio Forestal Canadiense creó un sistema informático para la divulgación de esta información, el denominado Canadian Wildland Fire Information System (WFIS) (Lee, 1995).

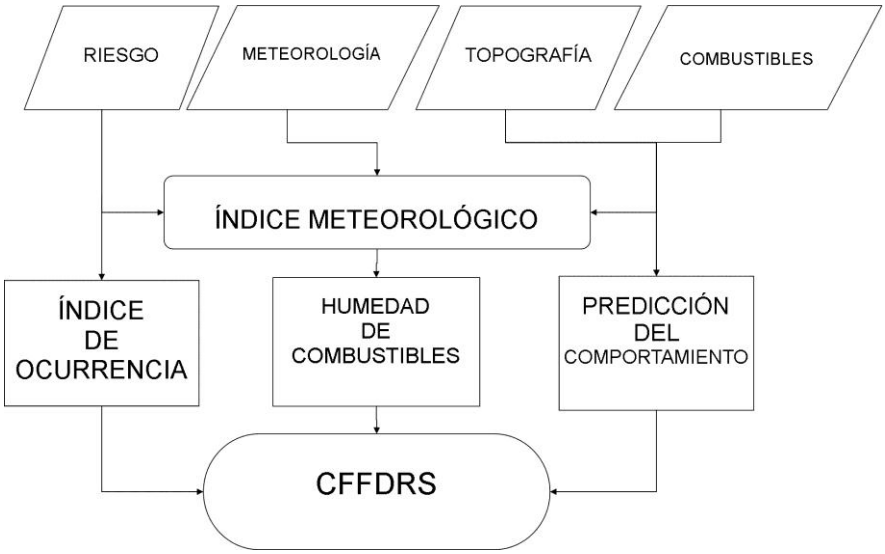


Figura 2. Esquema del Sistema Canadiense de Peligro de Incendios Forestales (CFFDRS).

Entre otras aportaciones está la de Vega *et al.* (1993), que han analizado, mediante un SIG, la utilidad de 28 variables para la predicción de incendios forestales iniciados por la actividad humana. Los resultados muestran que la ocurrencia de incendios está relacionada con variables humanas como la distancia a vías de comunicación, propiedad del suelo, entre otras.

3.2.3. Unión Europea

La Unión Europea, al enfrentarse a la problemática de los incendios forestales, decide crear un grupo de investigación dentro del denominado Joint Research Centre (JRC) para trabajar en la evaluación del riesgo de incendios forestales a escala europea (European Commission, 2010). Como fruto de esto se generó el índice avanzado o integrado de peligro de incendios a nivel europeo obtenido mediante la combinación de índices dinámicos y estructurales (Figura 3).

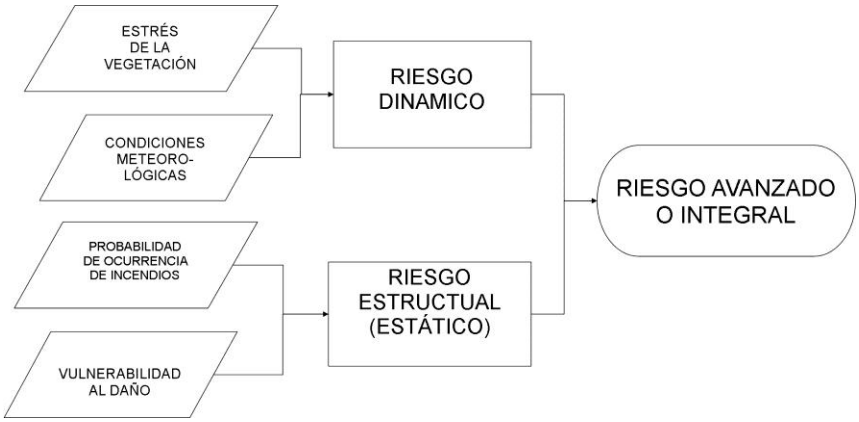


Figura 3. Esquema del Sistema de Peligro de Incendios Forestales propuesto por el JRC (Unión Europea).

Los componentes estructurales son: el índice de probabilidad de ocurrencia de un incendio el cual tiene como variables al combustible disponible, variables topográficas y socio-económicas, y el índice de vulnerabilidad que efectúa la estimación del daño probable que un incendio puede causar en una área determinada (Chuvieco y Martín, 2004).

Los componentes dinámicos son: las condiciones meteorológicas y el estrés de la vegetación basado en índices de vegetación obtenidos a partir de imágenes de satélite, principalmente las NOAA-AVHRR. Esta información es obtenida por el JRC y a su vez proporciona el Sistema de Pronóstico de Riesgo de Incendio Europeo (EFFRFS) (European Commission, 2010).

Otro índice utilizado es el Índice Potencial de Incendio (FPI) aplicando la metodología desarrollada por Borgan *et al.* (1998), en Estados Unidos y ajustada a la Unión Europea (Chuvieco y Martín, 2004).

3.2.4. España

España ha desarrollado el sistema denominado “Grado Actual de Peligro de Incendios Forestales”, el cual está conformado por un índice dinámico: el grado

meteorológico de peligro, y un índice estructural: el riesgo local de incendios (Figura 4). El primero es calculado a partir de variables meteorológicas (humedad relativa, temperatura y viento) y topográficas (pendiente y orientación). El segundo tiene en cuenta la frecuencia y causalidad de los incendios ocurridos en los últimos años y la combustibilidad de la vegetación (Chuvieco y Martín, 2004). Este sistema permite determinar las situaciones de alerta a las limitaciones en las actividades relacionadas con el monte y el fuego, y la distribución de los recursos de prevención y extinción (Vélez, 2000).

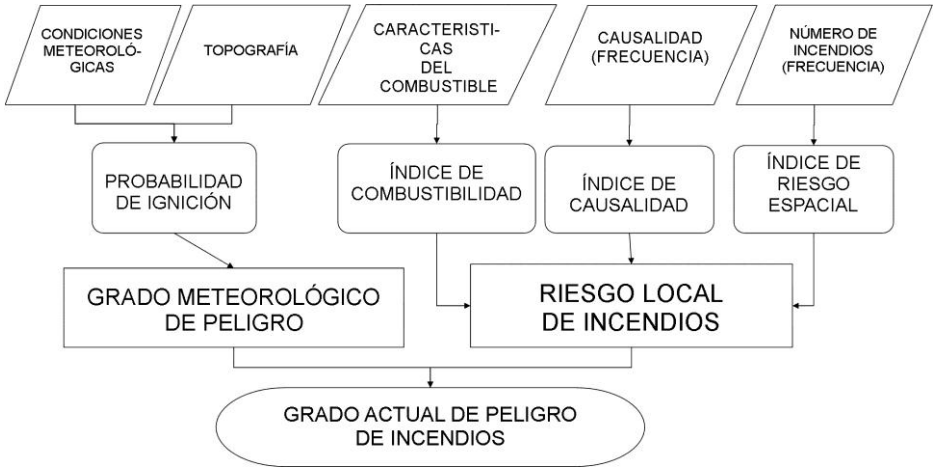


Figura 4. Esquema del Grado Actual de Peligro de Incendios Forestales (DGCNA).

El riesgo local de incendios está compuesto por tres subíndices: el riesgo espacial, causalidad y combustibilidad. El grado meteorológico de peligro considera la probabilidad de ignición, que a su vez está compuesta por variables como: temperatura, precipitación, exposición, entre otras. El índice operativo en la actualidad es el Grado Meteorológico de Peligro (Chuvieco y Martín, 2004).

En la creación de mejores herramientas para análisis correspondientes a la problemática de los incendios forestales presentes, Chuvieco y Martín (2004)

mencionan que la estimación del riesgo a largo plazo considera aquellas variables que son más estables en el tiempo y que afectan tanto a la ignición como a la propagación. Entre estas variables estructurales pueden destacarse la topografía (pendiente, orientación, altura, entre otras), las características del combustible (cantidad de biomasa, relación altura/superficie, compacidad, inflamabilidad, entre otras), las actividades humanas (uso del suelo, actividades recreativas, entre otras) y las características climáticas de la zona, tendencias generales de la variabilidad atmosférica. Esta escala temporal es la adecuada para definir patrones espaciales de riesgo y para el diseño de planes de prevención y extinción de los incendios forestales.

Más recientemente fue encontrado que el 96% de los incendios ocurridos en España se debieron directa o indirectamente a la acción del ser humano, lo que pone de manifiesto la estrecha relación existente entre incendios y actividades humanas. Además ha sido recopilado un total de 26 variables independientes que están relacionadas con la ocurrencia de incendios forestales y su propagación (Martínez *et al.*, 2003; Martínez *et al.*, 2005).

Pese a que el NFDRS aparece como un sistema de peligro integrado, el CFFDRS tiene módulos de ocurrencia, el EFFRFS propone módulos integradores y el DGCNA contempla componentes integradores, la realidad es que todos estos sistemas operan principalmente con los módulos obtenidos a partir de la información meteorológica e imágenes de satélite, y en algunos casos los módulos de ocurrencia están menos desarrollados y su uso es menor o no se encuentran en pleno funcionamiento. De hecho, la mayoría de los

gestores basan sus decisiones en el índice de combustión o datos meteorológicos, debido a dos razones; indicar el estado de las variables atmosféricas relacionadas con el contenido de humedad del combustible y son calculados de forma rutinaria por los servicios meteorológicos nacionales o regionales y por consiguiente no requieren redes especificas de medida (Chuvieco y Martín, 2004).

Los esfuerzos de los países de Estado Unidos, Canadá, España, además de la Unión Europea son de vital importancia, aunque no son los únicos que han contribuido a la investigación de los incendios forestales, también están países como Australia, Francia, Grecia, Portugal y Brasil.

Este último ha desarrollado investigación con respecto a la prevención y control de incendios forestales, utilizando imágenes de satélite para detección de focos activos y la evaluación del peligro de incendios (Chuvieco y Martín, 2004).

Con respecto a las investigaciones más recientes, Martínez (2005) menciona que las aproximaciones son simplistas por considerar tan sólo una pequeña parte del conjunto de factores socio-económicos vinculados a la ocurrencia de incendios, habitualmente los relacionados con la accesibilidad, por ser los más fácilmente representados en el espacio.

El problema observado es que los incendios están fuertemente ligados a la actividad humana, siendo fruto del desarrollo socio-económico y del consiguiente estilo de vida, los que generan un aumento en el riesgo de que se presente un incendio. Por lo que resulta evidente el interés de considerar el factor humano en la planificación de las labores de gestión y protección contra

incendios de los espacios forestales, sin embargo, esta evidencia contrasta con la escasa importancia concedida a los factores humanos en los análisis cuantitativos del riesgo, por lo que información de esta naturaleza no está disponible (Martell *et al.*, 1987; Rodríguez, 1996; Rodríguez *et al.*, 2008; Rodríguez *et al.*, 2011).

Las variables más utilizadas son las de carácter ambiental entre las que están:

1. Las meteorológicas: humedad relativa, velocidad del viento, mes del año, régimen de temperatura, régimen de precipitación.
2. Vegetación: cantidad, distribución, tipo y continuidad tanto vertical como horizontal de combustibles, tipo, distribución, fragmentación y densidad de tipo de vegetación natural.
3. Topográficas: elevación, exposición, pendiente (Vega *et al.*, 1999; Rodríguez, 1996; Chou *et al*., 1990; Chuvieco y Martín, 2004)

Algunas variables socio-económico a incluir en estudios de esta naturaleza son:

1. Transformaciones socioeconómicas: distancia a ciudades, densidad de población, número de personas presentes en un día determinado, actividades desarrolladas por la población, abandono de actividades tradicionales en el monte, abandono de cultivos en tierras marginales, población rural envejecida, aumento de uso recreativo en áreas forestales, interfaz urbano/forestal, interfaz cultivo/forestal, crecimiento de áreas urbanas, vertederos, basureros mantenidos con fuego, desinterés por el monte y su conservación.

2. Mantenimiento de actividades económicas tradicionales en áreas rurales: actividades ganaderas, actividades agrícolas, labores forestales, índices de cambio de superficie forestal, porcentaje de jefes de explotación agraria, carga ganadera, densidad de máquinas agrícolas.
3. Otros factores no intencionales: estructura de usos del territorio, distancia a la red vial, red vial sin tomar en cuenta autopistas, accesibilidad de zonas forestales, vías de ferrocarril, líneas eléctricas, motores y máquinas, canteras, maniobras militares, recursos de vigilancia y extinción de incendios.
4. Transformaciones de usos: especulación urbanística, declaración de zonas protegidas, tipo de propiedad, plazas hoteleras totales.
5. Actividades cinegéticas.
6. Titularidad y gestión de los montes: montes preservados y de utilidad pública, montes de consorcio.
7. Obtención de salarios y/o subvenciones: renta per cápita, tasa de paro (indicador de desempleo).
8. Especulación con el precio de la madera.
9. Otras causas intencionales: venganzas, pirómanos, vandalismo, delincuencia, etc. (Martell *et al.*, 1987; Chou *et al*., 1990; Vilar del Hoyo *et al.*, 2008, Chuvieco y Martín, 2004; Chuvieco y Congalton, 1989).

En cuanto a los métodos utilizados en los países ya mencionados, Chuvieco y Martín (2004) aseguran que las variables de carácter humano son ciertamente complejas de valorar, modelar y representar en un entorno SIG, por cuanto son muy diversas y difíciles de expresarlas espacialmente.

Esto ha llevado a los investigadores a evaluar técnicas para la obtención indirecta de estimadores del riesgo, utilizando variables temporales, meteorológicas y geográficas capaces de describir la distribución y variación de niveles de riesgo contemplando lo humano y lo físico-ambiental: meteorología + topografía + combustibles (Vega *et al.*, 1999).

En este sentido, pueden diferenciarse cuatro tipos de aproximaciones metodológicas diferentes: métodos cualitativos, mediante ponderaciones basadas en el conocimiento de expertos; métodos cuantitativos, basados en Evaluaciones Multicriterios u otros métodos de evaluación como el análisis de redes neuronales (Chuvieco *et al.,* 1998; Vega, 1994), distribución binomial negativa, distribución de Poison, modelos de Martell y People, lógica borrosa, con especial atención al riesgo diario (Chuvieco y Martín, 2004); técnicas de regresión, en las cuales son aplicados estimaciones de tipo estadístico para explicar la ocurrencia, pudiendo contarse entre éstas a la regresión lineal múltiple (Donoghue y Main, 1985), la regresión logística (Chou *et al.,* 1993; Martell *et al.*, 1989; Vega *et al.*, 1993); y, finalmente, modelos físicos, fundamentados en información meteorológica o en modelos de propagación del fuego, basados algunos de estos en la superposición de informaciones (Chuvieco y Martín, 2004).

La metodología propuesta por Chuvieco y Congalton (1989) ha sido utilizada en otras regiones del centro de Grecia (Vliegher, 1992), en el noreste de Australia (Ahmad y McDougall, 1992) y en el norte de la India (Abhineet *el al.*, 1996), en los cuales usan asentamientos humanos como variable en vez de áreas recreativas.

Las metodologías aplicadas hasta el momento utilizan diferentes técnicas de análisis, entre las que esta la aplicación del modelo logístico, el cual diversos autores lo han aplicado con éxito para la obtención de modelos predictivos de inicio del incendio: Martínez *et al.* (2005) que han trabajado a escala regional y Vega *et al.* (1993) con Pew *et al.* (2001) a escala local. En otros estudios utilizan esta técnica para la predicción de la ocurrencia diaria: Martell *et al.* (1987); Loftsgaarden y Andrews (1992); Chou (1993) y Vega *et al.* (1994). Otra aplicación han sido para estudiar la interacción entre la ocurrencia de incendio y patrones de vegetación bajo la influencia de factores ambientales y actividades humanas. También para su comparación con los resultados obtenidos mediante otras técnicas como redes neuronales (Carvacho, 1998).

Por lo anterior, el modelo logístico ofrece ventajas de cálculo sobre otros como el modelo probit (Maddala, 1986) y las redes neuronales donde el porcentaje total de predicciones correctas de la mejor red superó sólo en un 2% al porcentaje del mejor modelo logístico sin incluir variables geográficas (Vega *et al.*, 1999).

Los análisis globales suelen utilizarse para establecer políticas generales de prevención contra incendios, que en muchas ocasiones, se insertan en contextos internacionales (Carvacho *et al.*, 1998); los análisis a escala local se adaptan más a planes específicos de lucha contra incendios para regiones o provincias. En un análisis de riesgo a largo plazo, se contemplan aquellos factores que son más estables en el tiempo, como, por ejemplo, la cantidad de combustibles, la proximidad a vías de comunicación o a las características topográficas (Chuvieco *et al.*, 1998; Vliegher, 1992); este tipo de estimaciones son las que definen políticas de intervención más generales.

3.3. Incendios forestales e Índices de Peligro en México

México juega un papel relevante a nivel internacional en la toma de decisiones en aspectos como el cambio climático global, potencial de captura de carbono y la integración de la sociedad en el manejo del fuego. Aun cuando existen avances científicos se observa que la mayoría de los trabajos de investigación están enfocados al estudio de los efectos del fuego en la vegetación. También se cuenta con estudios sobre el régimen de incendios, y evaluación y caracterización de los combustibles forestales (Flores *et al.*, 2006).

Sin embargo, poco se han trabajado los aspectos climáticos referidos al fuego, los efectos topográficos tanto en la presencia de combustibles, como en el comportamiento del fuego además de que en la mayoría de los estudios no se ha tomado en cuenta la influencia directa o indirecta de los seres humanos como factores determinantes en la presencia de estos siniestros, por lo que se llega a la conclusión de que la investigación sobre la ecología del fuego y sobre

incendios forestales no es la suficiente (Flores *et al*., 2006). Por otro lado, adolece de la falta de información y el mal manejo del fuego por lo que es requerida la elaboración de estudios que contemplen la obtención de mejores herramientas para el manejo del fuego (Rodríguez, 1996).

La problemática presente durante los últimos años refleja que se han presentado en promedio 7,939 incendios forestales al año, que afectan a 207,214 ha (Cuadro 1).

Cuadro 1. Estadísticas de incendios forestales del 2000 al 2010.

AÑO	CANTIDAD DE INCENDIOS	SUPERFICIE AFECTADA (ha)	SUPERFICIE AFECTADA POR INCENDIOS (ha)
2000	8,557	235,915	28
2001	6,340	136,879	22
2002	8,160	198,543	24
2003	8,211	322,448	39
2004	6,293	81,234	13
2005	9,709	276,089	27
2006	8,745	243,882	28
2007	5,889	141,656	24
2008	9,735	231,645	24
2009	9,569	296,344	31
2010	6,125	114,723	19
PROMEDIO	**7,939**	**207,214**	**25**

Fuente: CONAFOR 2000-2010.

La información antes mencionada, es de importancia no únicamente para hacer más eficientes la detección y la mejor ubicación de las brigadas de combate, además es sumamente útil para llevar a cabo una buena campaña preventiva (Rodríguez, 1996). En los últimos años, el desarrollo de nuevas tecnologías ha permitido diseñar y operar sistemas de percepción remota, adaptados bien a la detección de incendios forestales (Flores *et al.*, 2006).

Las instancias encargadas de evaluar la situación de los incendios forestales han sido el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), obteniendo información relevante (información meteorológica e índices de peligro meteorológicos), integrando el denominado “Sistema Nacional de Alerta Roja ” que utilizan otras dependencias como es el caso de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y de la Coordinación Nacional de Protección Civil de la Secretaría de Gobernación entre otros (Flores *et al.*, 2006).

En este sentido, Rodríguez (1996) menciona que existe documentación de investigaciones en índices de peligrosidad o riesgo de incendios forestales desde la década del 80 hasta la actualidad, por parte de investigadores nacionales como lo son: Magaña (1983), Martín y Borja (1984), Melgar (1986), Zapata (1991), Santillán (1993), entre otros, todos ellos dándole un enfoque diferente. Estas investigaciones toman en cuenta la ocurrencia de incendios forestales y la superficie que afectan, los cuales son fenómenos influenciados por una conjugación de diversos factores, entre los cuales se encuentran los climáticos, topográficos y socioeconómicos (Figura 5).

En esta línea, Rentería (2004) desarrolló modelos digitales para riesgo de incendios forestales en la comunidad de Pueblo Nuevo, Durango e ideado como herramienta para la toma de decisiones en el plan de manejo de los combustibles forestales.

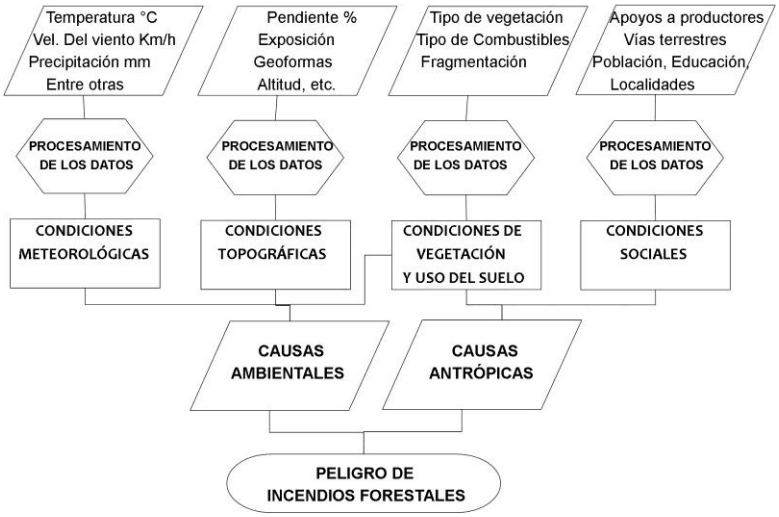


Figura 5. Esquema del sistema básico de predicción del peligro de incendios forestales modificado (Santillán, 1993).

Muñoz *et al.* (2005) emplearon métodos de análisis espacial multicriterio para integrar y evaluar en un sistema de información geográfica variables que tienen alta influencia en el peligro de incendios forestales. La estructura del IPIF (Índice de Peligro de Incendios Forestales) incluyó tres componentes: combustibles forestales (cama de combustibles, combustibles ligeros, combustibles pesados y la profundidad de la cama de combustibles), meteorológico (temperatura media máxima mensual, precipitación total mensual y orientación de la pendiente), y causas (distancia a brechas, veredas, carreteras y poblados). El IPIF demuestra que las condiciones meteorológicas recibieron un 60 % de importancia, la cantidad y tipo de combustibles el 25% y los factores socioeconómicos el porcentaje restante, atribuyéndolo a que esta poco poblado, no realizan actividades recreativas y no existen problemas de litigios.

Román y Martínez (2006) concluyen que existe relación significativa entre la densidad de caminos, extensión de tierra agrícola y el fuego forestal en una

reserva de la biosfera en Chiapas, México. En cambio, en un estudio realizado en la Reserva Forestal Las Bayas dentro del estado de Durango, se demostró que la ocurrencia de incendios forestales está relacionada con las variaciones extremas del clima (Drury y Veblen, 2008).

Rodríguez *et al.* (2008) realizaron un estudio enfocado a identificar los factores en siniestralidad de los incendios forestales, del cual se generaron siete ecuaciones de regresión para explicar estimadores de incendios forestales a partir de las variables de estudio (86 variables propuestas entre las que están las meteorológicas, productivas, de uso del suelo, sociales e indicadores relacionados con incendios forestales).

De estas ecuaciones se encontró que existe un coeficiente de correlación entre 0.55 – 0.99 y que resultaron altamente significativos (p de 0.0006 a < 0.0001). Las variables explicativas superficie de áreas perturbadas, velocidad máxima de entre las máximas de viento y número de productores agrícolas apoyados económicamente en el ciclo productivo primavera-verano, tuvieron correlación positiva con variables dependientes relacionadas con siniestralidad.

Las variables nivel de alfabetización y esperanza de vida expresaron una correlación negativa. El número de combatientes profesionales mostró una correlación negativa. El índice de desarrollo humano por género estuvo inversamente relacionado con la siniestralidad.

Ávila *et al.* (2010) analizaron los patrones de ocurrencia de incendios forestales en el Estado de Durango, encontrando que la ocurrencia es una función de variables que no son constantes en el espacio. Esta influencia espacial fue

analizada con el método de regresión geográfica ponderada, la cual asume la existencia de variaciones locales en los parámetros estimados y al mismo tiempo incluye un sistema geográfico ponderado de acuerdo a la localización geográfica.

Las variables utilizadas en este estudio fueron: pendiente (%), temperatura (°C), precipitación (mm), intensidad de cambios de uso del suelo (personas/km^2) y susceptibilidad de la vegetación al fuego (%). Ellos concluyen que el análisis sobre los patrones espaciales de la ocurrencia de los incendios forestales y los factores físicos, ambientales y sociales indica que los sociales son uno de los más importantes, y la combinación del uso intensivo de la tierra, tratamientos topográficos y variaciones climáticas incrementa la probabilidad de ignición.

Más recientemente, Rodríguez *et al.* (2011), generaron un índice de peligro con dos componentes, el componente de riesgo por medio del método de regresión logística y un componente de peligro los cuales generan a su vez el índice de peligro para la península de Yucatán después del paso del Huracán Deán. Para el caso del componente de riesgo se propusieron las variables de número de áreas agropecuarias, superficie de áreas agropecuarias, perímetro de áreas agropecuarias, número y longitud de caminos, de los cuales sólo el intercepto y el perímetro de áreas agropecuarias resultó significativo los demás no fueron significativos.

La información antes mencionada es de las pocas que se han trabajado, además de que en otras investigaciones no contemplan directamente la influencia del ser humano como variable de peso en los modelos. Es evidente la

necesidad de planificar el uso del suelo en espacio y tiempo; dicho en otras palabras, de ordenar el territorio. Por lo que se propone la investigación de análisis de peligro de incendios forestales tomando en cuenta la referencia de variables ya trabajadas y aumentando con gran interés la influencia de las variables sociales para la obtención de índices de peligro más completos.

Las investigaciones realizadas hasta el momento, aportan conocimiento respecto a índices desarrollados a nivel mundial, los cuales resultan de gran utilidad para predecir el peligro en tiempo y espacio, fomentando un mejor manejo del fuego. Lo que contribuye a determinar épocas y regiones de distintos grados de peligro de incendios forestales, objetivo último de un sistema de predicción, fortaleciendo las decisiones tomadas por los gestores las cuales son de aplicación a escalas temporales y espaciales distintas.

Analizando la información de la revisión de literatura se observa que los métodos utilizados para estimar el peligro de incendios nos indica que existen varios enfoques para su evaluación, en los que no sólo las variables utilizadas y los métodos de investigación son diferentes, sino también la escala espacial y temporal empleada para los productos derivados. La presente investigación fue desarrollada como una forma de contribuir a exponer alternativas de enfrentar el problema y en la cual se planteó la hipótesis para demostrar que los incendios forestales están relacionados con la influencia del ser humano y las condiciones ambientales presentes, lo que contribuye a predecir con cierta probabilidad la presencia de éstos y su eventual combate.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Materiales

Una de las cosas que se tienen que tomar en cuenta es que la información sea confiable para describir la naturaleza de los incendios forestales, los agentes causales y las condiciones que los favorecen (Flores *et al.*, 2011). Para este estudio se obtuvo información de distintas instancias, principalmente gubernamentales, como: estadísticas de incendios forestales y documentación producida por la CONAFOR; información digital y cartografía temática del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), entre ellas la información topográfica, clima, uso del suelo y vegetación (INEGI, 2006a; INEGI, 2006b); estadísticas e información espacial como puntos de calor de la CONABIO (2010); y e información climática del SMN (SMN, 2000; WMO, 2007); las cuales proporcionaron información relacionada a las variables de influencia para la ocurrencia de incendios forestales.

Además de lo anterior fue utilizado equipo computacional para el procesamiento de la información obtenida. Estos equipos son: un sistema de información geográfica (SIG´s) utilizando el paquete Arc View 3.3, ArcGIS 9.3 (ESRI, 2006; ESRI, 2008), Surfer 7.00 (Surfer, 1999) y además de AutoCad (AutoCad, 2004); para el caso de las bases de datos fueron utilizados de Statistical Analisys System (SAS) versión 9.0 (SAS, 2002) y Office Excel para Windows (Excel,

2007), por ser los mas prácticos, accesibles y utilizados. Por último se necesitó de impresiones para la cartografía resultado de la investigación.

4.2. Métodos

4.2.1. Área de estudio

El trabajo se llevó a cabo en el estado de Puebla, localizado entre las coordenadas extremas (20° 51.6' y 17° 49.8') latitud Norte y (99° 5.4' y 96° 43.8') longitud Oeste. Tiene una superficie de 33 919 km^2, contando con una población de 4, 693, 709 habitantes (Marín *et al.*, 2009). Está conformado por 217 municipios (INEGI, 2005) y colinda con los estados de Hidalgo, Tlaxcala, México, Morelos, Guerrero, Oaxaca y Veracruz (Figura 6).

Su localización geográfica, extensión y orografía generan en este estado una gran variabilidad de ecosistemas, entre los que se definen los siguientes: bosques de (pino, encino, galería, oyamel, táscate, y mesófilo de montaña), pastizales, palmares, selvas alta y baja, chaparrales, mezquitales, matorrales y vegetación halófita (Rzedowski, 1986; INEGI, 2006a). Además de presentar alteraciones provocadas por las actividades agropecuarias, forestales y de otros usos del suelo.

Su altitud varia desde los 0 - 5000 msnm, con climas que van de tropicales (A), pasando por Desérticos (B) y Templados (C), llegando hasta algunos fríos (E), lo que conlleva una variabilidad de condiciones climáticas (García, 2004).

Figura 6. Mapa de localización del área de estudio, estado de Puebla, México.

Una vez identificados los factores antrópicos relacionados con la ocurrencia de incendios forestales y de cara a su utilización operativa en modelos de predicción del peligro de incendios en el estado de Puebla, fue necesaria su cuantificación y representación espacial en forma de variables estadísticas y/o cartográficas, para lo cual se requirió de realizar un muestreo.

4.2.2. Cálculo de intensidad de muestreo

En el periodo del 2004-2009 se reportaron un total de 923 puntos de calor para el estado de Puebla, tomando en cuenta el reporte de puntos de calor diurnos y nocturnos (CONABIO, 2010), con la información de la variable dependiente identificada -puntos de calor- , se generó la unidad de muestreo con una superficie de 10 x 10 km y 10,000 ha tomando en cuenta experiencia profesional y estudios antes realizados como en el caso del Huracán Dean (Rodríguez *et al.*, 2001), para esto se realizó una red base correspondiente a todo el estado de Puebla (Figura 7).

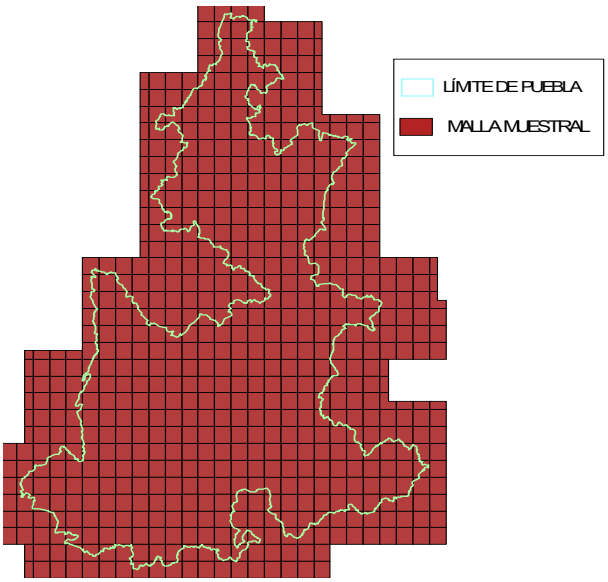


Figura 7. Red muestral del estado de Puebla, con unidades de muestreo de 10 x 10 km (10,000 ha).

Se utilizó el método de muestreo sistemático, del cual el tamaño de la muestra fue el presentado en la Figura 8, generando un total de 85 unidades de muestreo. La superficie muestreada fue igual a 850,000 ha, el 25% de la superficie total del estado, dentro de la cual se extrajeron las variables explicativas.

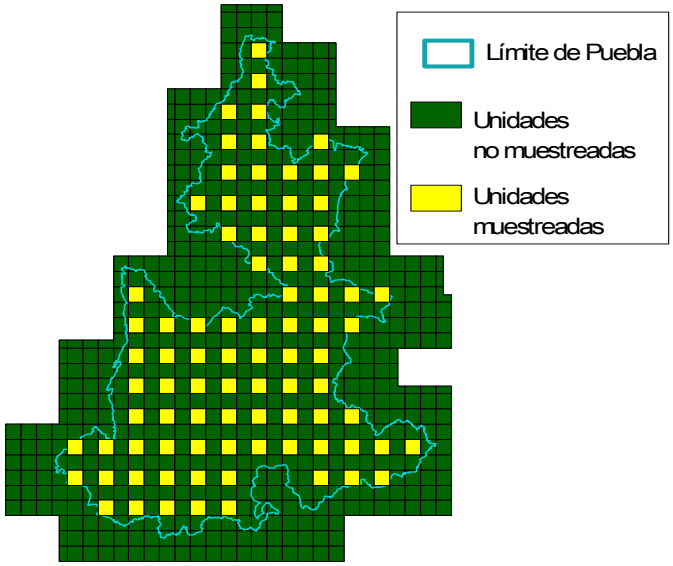


Figura 8. Muestreo sistemático, con 85 unidades muestreadas.

La finalidad de definir estas áreas fue para la extracción de la información de todas las variables propuestas y conocer la influencia de estas variables con respecto a la ocurrencia de incendios, según método propuesto por Rodríguez *et al.* (2011).

4.2.3. Determinación y construcción de variables explicativas y de respuestas

Primero fueron identificadas las variables más importantes para la predicción de los incendios en el estado de Puebla, para ello se llevo a cabo una exhaustiva recopilación de fuentes bibliográficas (Vilar del Hoyo *et al.*, 2008; Vega *et al.*, 1993; Rodríguez, 1996; Chuvieco y Martín, 2004; Muñoz *et al.*, 2005; Flores *et al.*, 2006; Román y Martínez, 2006; Rodríguez *et al.*, 2008; Avila *et al.*, 2010; Rodríguez *et al.*, 2011), agrupadas en cuatro tipos: factores meteorológicos, topográficos, de uso del suelo y sociales.

El estudio fue limitado por la falta de información a un nivel aceptable de algunas variables de interés: velocidad de viento y humedad relativa (WMO, 2007) y por otras causas como la difícil representación espacial de algunas otras variables: apoyos a productores, subsidios a actividades agropecuarias y forestales (INEGI, 2007). En consecuencia, se realizó una selección de las mismas para el desarrollo de modelos con datos de puntos de calor de un periodo de cinco años (2004-2009).

Se buscaron variables explicativas independientes entre sí, que estimaran la variable de siniestralidad de interés, esto basado parcialmente en el esquema del sistema básico de predicción del peligro de incendios forestales (Figura 5) y

tomando en cuenta que en el país las actividades agropecuarias son las causas de origen de incendio más frecuente e importante (CONAFOR, 2011).

4.2.4. Análisis estadístico

En los modelos, las variables espaciales o categorías propuestas en relación al peligro de incendios forestales fueron un total de 32, de las cuales se realizó una depuración por medio de consulta bibliográfica y por experiencia de expertos. Después de seleccionar las variables, depurarlas y realizar los análisis oportunos, se obtuvieron 13 variables explicativas asociadas a la presencia de puntos de calor en Puebla, los cuales fueron considerados como la variable respuesta.

Finalmente, para el presente trabajo se consideró como índice de peligro a la combinación de factores que dan origen a los incendios forestales. Las variables seleccionadas para el análisis son las mostradas en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Variables explicativas analizadas.

Grupo	Clave	Variable	Unidad
Meteorológicas	Tma	Temperatura media anual	°C
	Pma	Precipitación media anual	mm
Topográficas	Xpo	Exposición	azimut
	Pen	Pendiente	%
	Alt	Altitud	msnm
Uso del suelo	Pea	Actividad agropecuaria (perímetro)	m
	Ara	Actividad agropecuaria (área)	ha
	Fra	Actividad agropecuaria (número de fragmentos)	fragmentos
	Lov	Vías de comunicación (longitud de caminos)	m
	Rav	Vías de comunicación (número de ramales de caminos)	ramales
Sociales	Pob	Población total	personas
	Alf	Población de analfabetas	personas
	Noc	Número de comunidades rurales	comunidades

En resumen se han obtenido 13 variables para el estado de Puebla, a partir de fuentes cartográficas diversas, de escalas variables entre 1:250 000 y 1:50 000. Además de cuatro variables obtenidas de información estadística censal (INEGI, 2005). La falta de datos de algunas variables ha obligado a desecharlas. Al estar definidas las variables utilizadas en el análisis estadístico, se procedió a obtener éstas en un formato manejable dentro de un sistema de información geográfica para su mejor manipulación, por lo cual, a continuación se describe el proceso para cada conjunto de variables.

4.2.4.1. Variables Meteorológicas

La escasez de estaciones meteorológicas en el país hace poco posible incorporar factores climáticos al análisis ecológico (Gómez *et al.*, 2007; Gómez *et al.*, 2008), por lo que se procedió a eliminar algunas variables importantes de carácter meteorológico (velocidad del viento y humedad relativa) y enfocarse en la temperatura media anual y la precipitación media anual. El SMN proporcionó información de 66 estaciones climatológicas que fue extraída del sistema CLICOM (WMO, 2007). El análisis de estas variables ambientales fue realizado con el método empleado por Gómez *et al.* (2008) para obtener modelos que permitan estimar temperatura y precipitación en casos de escasa información.

El mapa de temperatura media anual fue obtenido mediante modelos de regresión lineal simple que analizan el comportamiento de la temperatura con respecto a la altura del suelo (Gómez *et al.*, 2008; Gómez *et al.*, 2011), aplicando el modelo digital de elevación (INEGI, 2010), y tomando en cuenta cinco zonas de distinto comportamiento en temperatura para Puebla.

El mapa de precipitación media anual fue desarrollado utilizando el método gráfico descrito por Gómez *et al.* (2008), el cual consiste en anotar los valores de la precipitación media anual de las estaciones meteorológicas utilizadas en imágenes de satélite Landsat 7 a escala 1:250 000 en falso color. Del mismo modo, se analizaron los diferentes sistemas de vientos que son responsables de la precipitación en cada zona. Para Puebla las zonas son: Mesa del centro, Alisios y Monzón de Norte América, Barlovento Alisios del Sur y Depresión del Balsas, estableciendo el impacto de la orografía y otros factores en la cantidad de precipitación reportados por las estaciones meteorológicas (Gómez *et al.*, 2008; Gómez *et al.*, 2011).

4.2.4.2. Variables Físicas

Para la obtención de las variables de pendiente, exposición y altitud se procedió a elaborar un modelo de elevación digital con una resolución espacial de 30 m, generado a partir de información de curvas de nivel. Se procedió a utilizar la herramienta de Spatial Analisis de Arcview para generar dos nuevos temas, el que deriva pendientes y el que deriva exposiciones.

La información obtenida de pendiente fue en formato raster con información de pendiente en cada uno de los pixeles lo que requirió de realizar una reclasificación de la información en intervalos (Cuadro 3) para su mejor comprensión y utilización en análisis posteriores.

Cuadro 3. Intervalos para porcentajes de pendientes en Puebla.

PENDIENTE (°)	PENDIENTE (%)
0.00 – 2.86	0-5
2.86 – 5.71	5-10
5.71 – 16.69	10-30
16.69 – 26.56	30-50
26.56 – 45.00	50-100
45.00 – 63.43	100-200
> 63.43	> 200

Para el caso de las exposiciones la información de orientación se obtuvo en azimut, por lo que requirió de reclasificarla para generar una categorización dependiendo de los ocho principales puntos cardinales (Cuadro 4), y mostrar más claramente la relación de esta variable con la ocurrencia de incendios forestales.

Cuadro 4. Intervalos para orientaciones en Puebla.

AZIMUT (°)	PUNTO CARDINAL
0 – 22.5 + 337.5 - 360	Norte
22.5 – 67.5	Noreste
67.5 – 112.5	Este
112.5 – 157.5	Sureste
157.5 – 202.5	Sur
202.5 – 247.5	Suroeste
247.5 – 292.5	Oeste
292.5 – 337.5	Noroeste

4.2.4.3. Variables de Uso del suelo

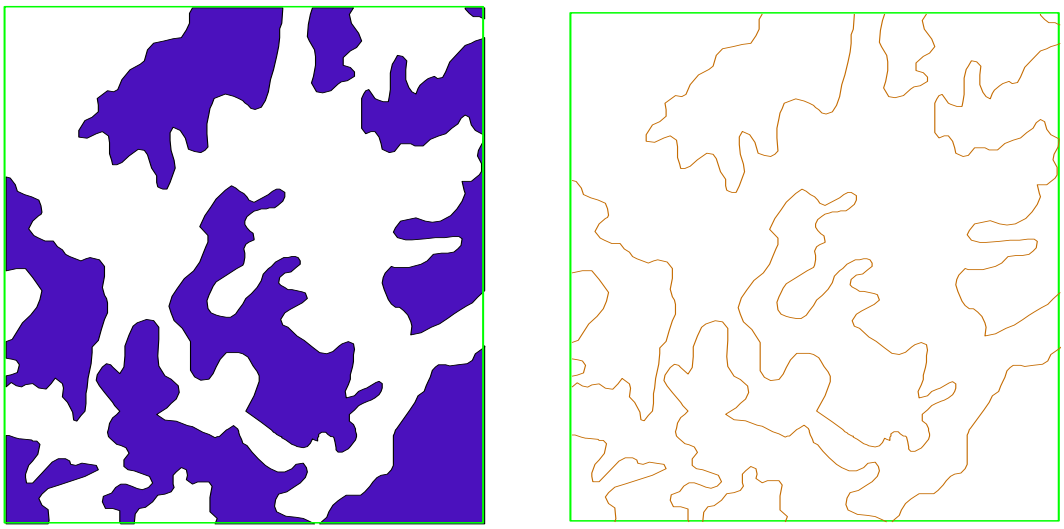
Dentro de este componente se incluyó la actividad agropecuaria, expresada en superficie, perímetro y fragmentación, que influyen en la presencia de incendios forestales, esto logrado a través de la evaluación de los tipos de vegetación para el estado de Puebla y su distribución espacial (INEGI, 2006a). Además

aquí se incluyó la ramificación y longitud de vías de comunicación (carreteras, caminos, brechas y veredas).

Teniendo el mapa de vegetación y uso del suelo (INEGI, 2006a) se procedió a calcular el área, perímetro y fragmentación agropecuaria dentro de cada unidad de muestreo. Para esto se agruparon los tipos de uso del suelo agrícolas (agricultura de temporal, riego y riego eventual) y ganadería (ésta expresada como pastizales cultivados e inducidos).

Ya extraída la información del uso del suelo agropecuario como se muestra en la Figura 9, se procedió a calcular la superficie total por unidad en hectáreas y fue agregada al formato de concentración de variables (Anexo 1). Para el caso de fragmentación se realizó un conteo de cada fragmento dentro de la unidad de muestreo (Figura 9 a) y anexada también al formato antes mencionado.

En el caso del cálculo del perímetro del área agropecuaria se tuvo que proceder de distinta forma, al generar nueva información transformando el mapa de superficies a un mapa de contornos –líneas- donde se reflejara el perímetro de las áreas agropecuarias y ya obtenidos los contorno se calculó la longitud total del perímetro (Figura 9 b).



a) b)

Figura 9. Estimación de superficie, fragmentación y perímetro agropecuario. a) superficie y fragmentación. b) perímetro.

En la obtención de la ramificación y longitud de vías de comunicación se procedió de la siguiente forma: teniendo el mapa de distribución de vías de comunicación (INEGI, 2006b), fue extraída la información por unidad de muestreo en la cual se realizó una sumatoria de las longitudes correspondientes a cada tipo de vía (carreteras, caminos, brechas y veredas), y fueron contabilizadas cada una de las ramificaciones considerando las carreteras como vías principales de las cuales se ramifican los caminos, brechas y finalmente las veredas (Figura 10).

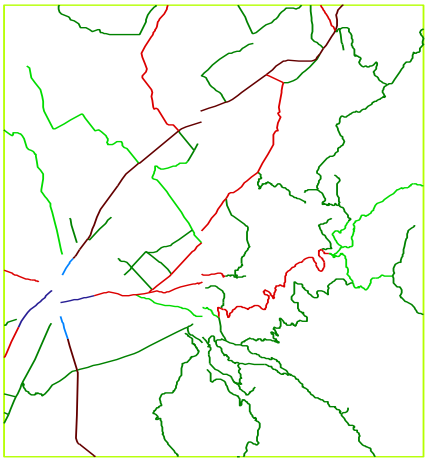


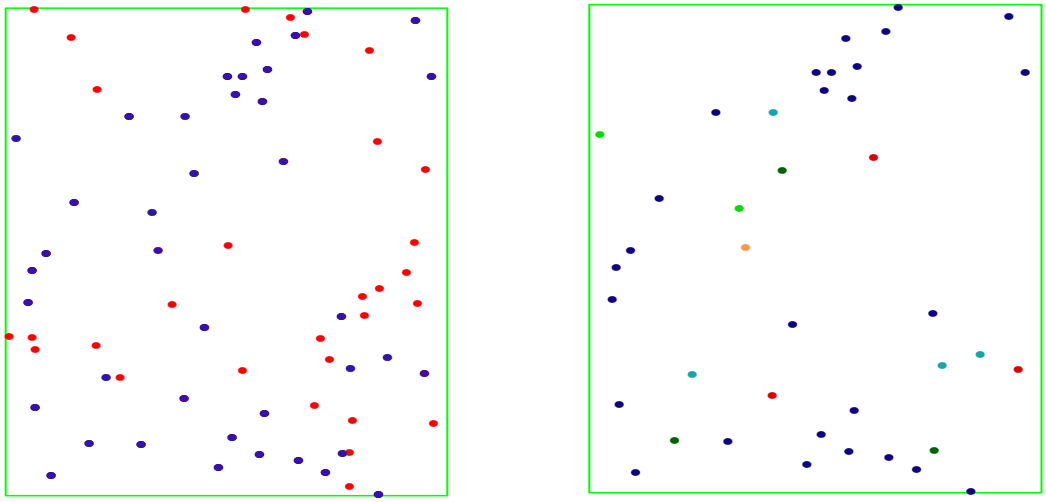
Figura 10. Estimación de la longitud y ramificación de vías de comunicación.

Esto se hizo con base en estudios dentro de México y otras partes que denotan la relación entre número de incendios o superficie afectada y densidad de caminos como el caso de una Reserva de la Biosfera localizada en Chiapas, México (Román, 2006).

4.2.4.4. Variables Sociales

Con respecto a las variables sociales, fueron obtenidas de la información proporcionada por INEGI del conteo realizado en el 2005 (INEGI, 2005). La información se obtuvo hasta nivel localidad y dentro de la estadística se contó con datos de coordenadas, los cuales ayudaron a que se representara espacialmente esta información.

Obtenida la distribución de las comunidades del estado de Puebla y municipios colindantes de otros estados, se procedió a eliminar comunidades que no reportaban datos en la estadística, posteriormente se acordó trabajar solo las comunidades de carácter rural, consideradas como las comunidades de < 15, 000 habitantes (Figura 11 a y b).



a) b)

Figura 11. Distribución de comunidades por unidad de muestreo.

a) Total de comunidades reportadas por el conteo 2005 realizado por INEGI.
b) comunidades rurales < 15, 000 habitantes con información disponible.

Al tener disponibles sólo las comunidades de <15,000 habitantes y con información censal, el siguiente paso fue obtener el número total de habitantes, número de habitantes analfabetas y número de comunidades, todos éstos por unidad de muestreo.

En el caso del número total de habitantes –población total- fue calculado por medio de la suma total de habitantes por unidad de muestreo, reflejando la presión ejercida por la población hacia la vegetación, y concentrado para su posterior análisis (Anexo 1).

El número de habitantes analfabetas fue obtenido sumando tres datos proporcionados en la estadística: habitantes de 8 años y más que son analfabetas, habitantes de 5 a 14 años que no asisten a la escuela, y habitantes de 15 años y más que no asisten a la escuela, la suma fue considerada como

los habitantes totales analfabetos de cada unidad de muestreo. El número de comunidades fue una suma directa del conteo de comunidades por unidad de muestreo. El resultado correspondiente a las 85 unidades de muestreo fue concentrado en un formato dentro del programa Excel (Anexo 1).

4.2.4.5. Variable de respuesta

La variable respuesta o dependiente a considerar fue los puntos de calor tanto diurnos como nocturnos proporcionados por CONABIO (2010) en formato shapefile de un periodo de 5 años (2004-2009), a los cuales se les realizó una modificación para extraer los puntos de calor dentro de áreas forestales y eliminar la presencia de pontos dentro de áreas agropecuarias, áreas sin vegetación, cuerpos de agua y ciudades que causaran “ruido” en el análisis, para quedarse con los denominados incendios forestales.

Estos últimos fueron introducidos como una variable de carácter binario, por lo que recibieron un valor de 1 si ocurría al menos un incendio en la unidad de muestreo y un valor de 0 si no hubo incendio. La elección del periodo de tiempo responde a la disponibilidad de la información y a que representan datos actuales.

4.2.5. Modelo logístico

Para el análisis estadístico de peligro de incendios forestales, se buscó el modelo que a partir de las variables explicativas independientes entre sí estimas la variable de siniestralidad, como es el caso del modelo de regresión logística (Hosmer y Lemeshow, 1989), que requiere de estimaciones de las variables involucradas en el análisis, acorde con el modelo:

$$P = \frac{1}{\left(1 + e^{-(\alpha+\beta_1 X_1+\beta_2 X_2+\beta_3 X_3+\ldots+\beta_n X_n)}\right)} \quad (1)$$

Donde: P= probabilidad de ocurrencia de incendios forestales, *e* = base de los logaritmos naturales, α = intersección en el eje de ordenadas, β_n = constante asociada a la variable independiente X_n, X_n = variable independiente (precipitación, combustible, tipo de vegetación, etc.)

Con referencia al análisis estadístico, éste se realizó con el procedimiento (PROC LOGISTIC), del programa SAS para microcomputadoras, versión 9.0. Se introdujeron 20 modelos, y fueron usados dos criterios para comparar la utilidad de los modelos logísticos desarrollados. El primero está basado en los parámetros estimados donde se examinaron los signos y magnitudes de los estimadores para comprobar que coincidían con las expectativas basadas en experiencias previas, además se usaron los valores del test X^2 y del estadístico de Wald (Ben-Akiva y Lerman, 1985) para evaluar si los parámetros estimados eran significativos. El segundo fue por medio de evaluar las capacidades predictivas del modelo por medio de tablas de clasificación de respuestas observadas y predichas 2 x 2 (Cuadro 5). El porcentaje total de observaciones predichas correctamente se calcula como (A+D)/(A+B+C+D).

Cuadro 5. Clasificación de respuestas observadas y predichas para el modelo.

FRECUENCIA / % OBSERVACIONES	PREDICHO NO INCENDIO	PREDICHO INCENDIO
OBSERVADO NO INCENDIO	A Especificidad	B Falsos positivos
OBSERVADO INCENDIO	C Falsos negativos	D Sensibilidad

Fuente: Hosmer y Lemeshow (2000).

4.2.6. Construcción del modelo de Peligro de Incendios para Puebla

Se utilizó Arcview 3.3 y ArcGIS 9.3 para establecer una calificación del peligro o grado de peligro para determinadas condiciones de precipitación, exposición, número de ramales y número de comunidades, por lo que se elaboró el Cuadro 6 de graduación del peligro en función de los valores obtenidos para la probabilidad de incendio forestal (P).

Cuadro 6. Categorías de peligro

Probabilidad de ocurrencia	Grado de peligro	Color asociado
0	-	
0.0 - 0.2	Mínimo	
0.2 – 0.4	Bajo	
0.4 - 0.6	Medio	
0.6 - 0.8	Alto	
0.8 - 1.0	Extremo	

Ya establecido el modelo a aplicar, este se introdujo en el programa Surfer, obteniéndose la probabilidad de peligro de incendios forestales para el área de estudio por medio del método de interpolación espacial, el cual es bastante precisa (FAO, 2001 y Chuvieco y Martín, 2004), facilitando la comprensión de los resultados y su posterior utilización para la toma de decisiones por parte de los gestores. La interpolación aplicada por Surfer es Kriging, considerada un método geoestadístico que provee, a partir de una muestra de puntos, ya sea regular o irregularmente distribuidos, valores estimados de aquellos sitios donde no hay información, sin sesgo y con una varianza mínima conocida (FAO, 2001).

4.2.7. Validación

La probabilidad de peligro de incendios forestales representa la susceptibilidad que tiene determinado territorio en mostrar mayor o menor presencia de incendios forestales. Esta probabilidad se determinó en función de las variables obtenidas en la elección del modelo. Se utilizaron diferentes datos de la muestra de incendios (2004-2009) para validar el modelo general con observaciones independientes. Estos datos incluyeron 30 unidades, con las cuales se llevó a cabo la validación mediante la prueba de Hosmer y Lemeshow (2000), anteriormente mencionada.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Variables Ambientales

La información fue expresada en el mapa de temperatura media anual donde se generalizaron modelos en cada una de las cinco zonas que fue dividido el estado de Puebla con respecto a temperatura, la estimación va de los -4.3°C en las regiones más elevadas (Volcán Popocatepetl, Iztaccihuatl y Pico de Orizaba) hasta los 26.1°C en regiones bajas (Figura 12). Tomando en cuenta las unidades de muestreo se extrajo la información para cada unidad (Anexo 1).

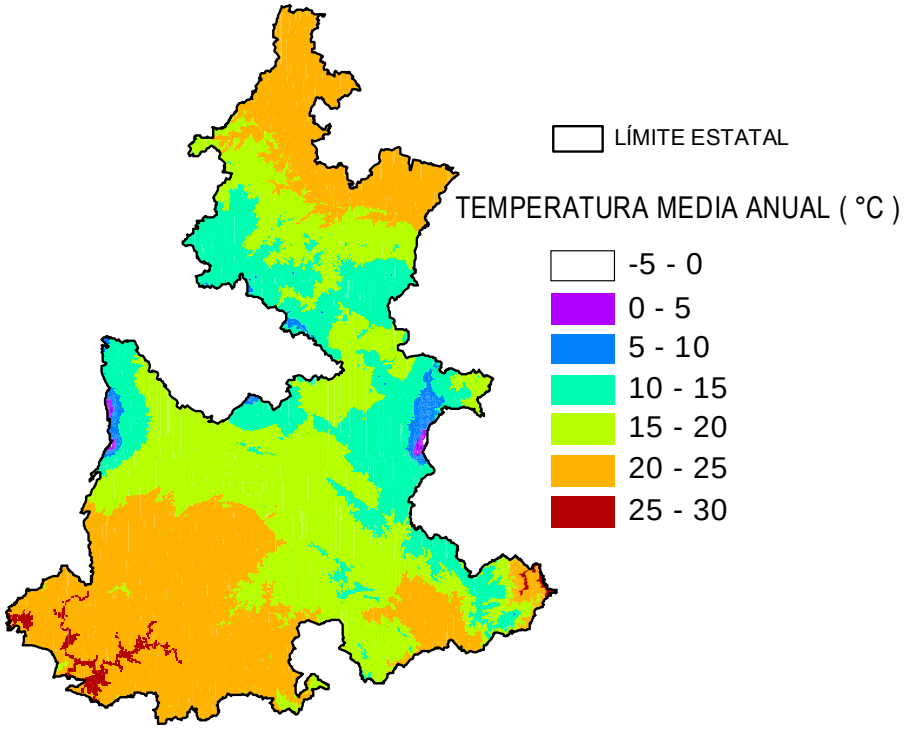


Figura 12: Temperatura media anual de Puebla, México.

Como la temperatura es una consecuencia del balance de energía, la evaporación y la transpiración serán más elevadas cuanto mayor sea ésta (Chuvieco y Martín, 2004), lo que fomenta la disponibilidad de combustibles y condiciones de sequia.

Para el caso de estimación de la precipitación, ésta se expresó de igual forma en el mapa de precipitación media anual con intervalos menores de 300 mm en la zona de la Depresión del Balsas hasta más de 3,000 mm en la Sierra del norte de Puebla, principalmente (Figura 13). Las precipitaciones más altas se encuentran dentro de la Sierra Madre Oriental, lo que se constituye como Sierra norte de Puebla y una parte del sureste de Puebla.

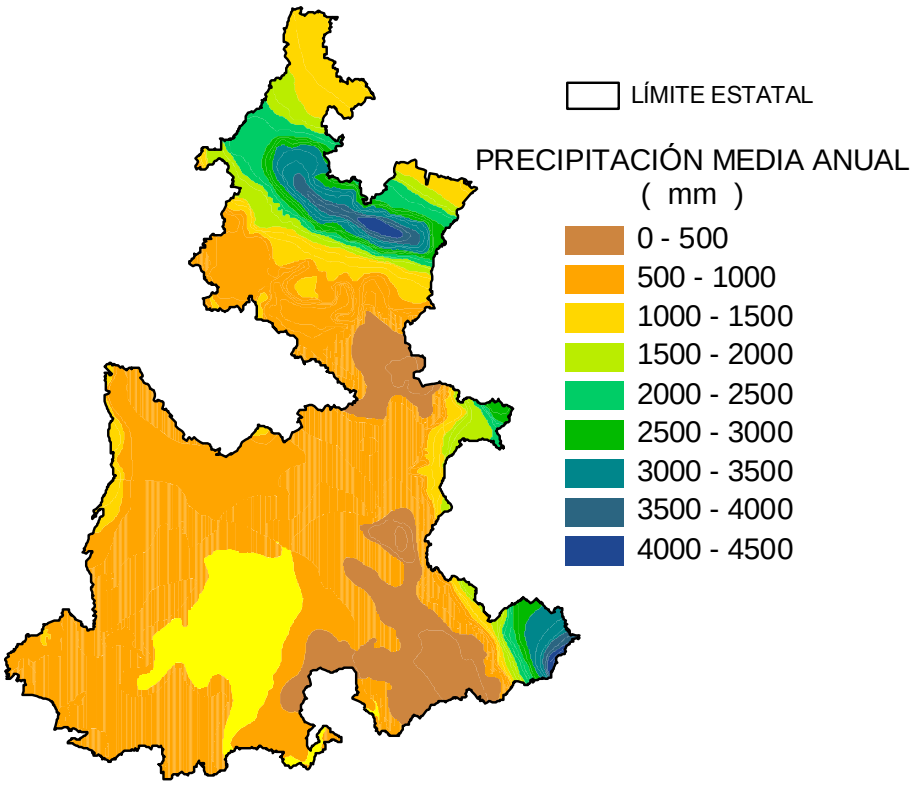


Figura 13: Precipitación media anual de Puebla, México.

La mayor parte del estado se encuentra entre precipitaciones menores a los 500 mm anuales. Con respecto a la vegetación viva, la precipitación es el factor principal que incrementa la reserva hídrica del suelo y por consiguiente, entre mayor agua disponible para la vegetación, mayor será la producción de biomasa y de combustibles forestales.

Por lo anterior, se debe tomar en cuenta que durante períodos prolongados de sequía, el crecimiento de los combustibles herbáceos es muy escaso, lo que no favorece la propagación de los incendios por falta de continuidad horizontal del combustible. Sin embargo, la sequía hace descender el contenido de humedad disponible en el suelo, necesario para la actividad fisiológica normal de la vegetación. Muchas plantas reaccionan ante la falta de agua reduciendo su crecimiento o perdiendo parte de su follaje, que pasará a formar parte de los combustibles muertos depositados en el suelo o quedando en la planta sin desprenderse, como material aéreo. Esta situación produce un peligro potencial de incendios muy elevado al incrementarse la posibilidad de desarrollar incendios de gran intensidad, debido a la acumulación de combustibles muertos. Por el contrario, si durante el invierno y primavera la precipitación ha sido abundante, la reserva hídrica estará en máximo y la sequia estival se puede retrasar hasta avanzado el verano. No obstante, hay que tomar precauciones porque la disponibilidad de combustibles herbáceos puede ocasionar un aumento de la carga de combustibles y un incremento en la probabilidad de ignición por la elevada presencia de elementos finos agostados,

junto con elevadas propagaciones dinámicas en el desplazamiento espacial del fuego (Chuvieco y Martín, 2004).

5.2. Variables Físicas

Las variables físicas, en este caso, pendiente, exposición del terreno y altitud fueron extraídas del Modelo de Elevación Digital.

La información correspondiente a la pendiente del terreno se obtuvo en porcentajes y se agrupó en siete intervalos de interés, los mostrados en el Cuadro 2, y que se puede observar su distribución espacial en la Figura 14.

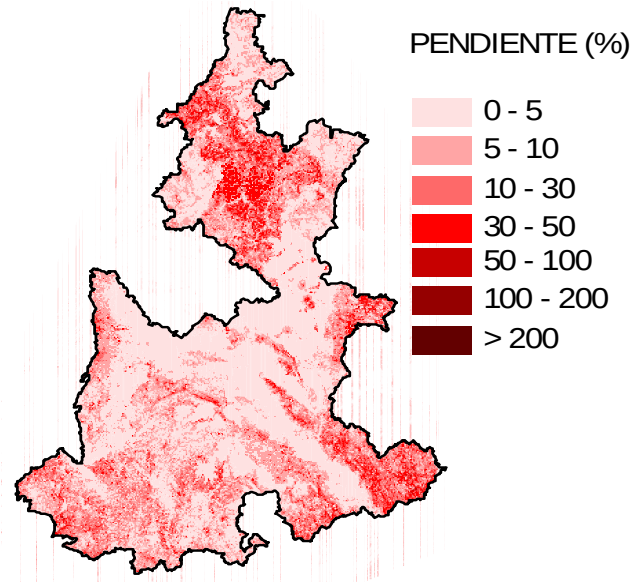


Figura 14. Pendientes del terreno para Puebla, México.

Las pendientes más pronunciadas se encuentran en la parte norte del estado, también cuenta con varias zonas planas correspondientes a los valles más importantes de Puebla, como son: el Valle de Puebla y el Valle de Tehuacán. Las pendientes van desde zonas planas (0%) hasta zonas muy escarpadas con pendientes >100%, dando al estado una gran variabilidad de formaciones topográficas.

Para el caso de la exposición, se manejó en intervalos de azimut (Cuadro 3) tomando en cuenta los ocho principales puntos cardinales y zona plana (Figura 15). Se observó que al igual que en el caso de la pendiente, en el estado de Puebla se encuentran muchas formaciones montañosas, lo cual da una gran variabilidad en las exposiciones.

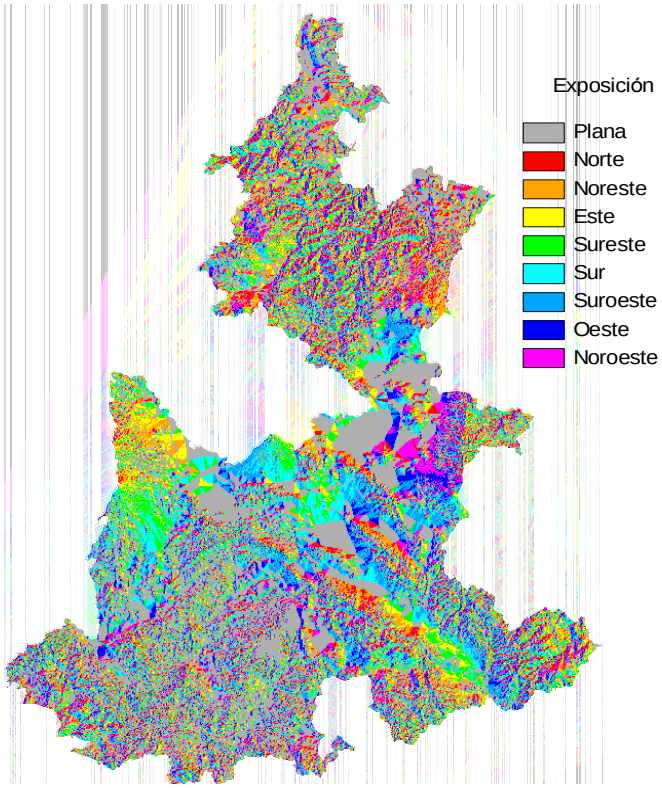


Figura 15. Exposiciones del terreno para Puebla, México.

A pesar de la gran variabilidad se pudieron observar tres zonas: la correspondiente al barlovento de la sierra madre occidental (en la parte noreste a sureste del estado), la zona del centro denominada mesa del centro, y la correspondiente a la depresión del balsas.

Respecto a la altura sobre el nivel del mar se generó un mapa de altimetría clasificado en siete intervalos de altura, como se muestra en la Figura 16. Del cual se extrajeron las altitudes de cada unidad muestreada, anexándolas al formato de concentración (Anexo 1).

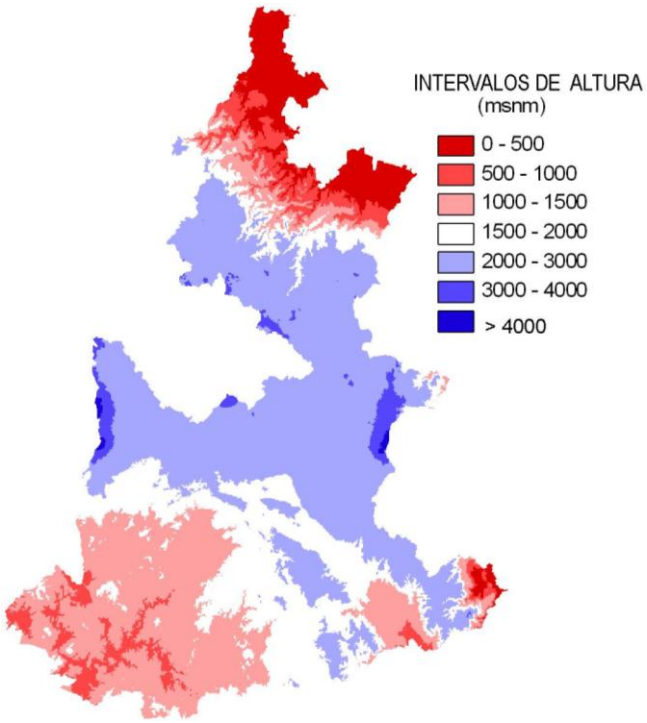


Figura 16. Altimetría de Puebla, México.

5.3. Variables de Uso del suelo

Para el caso de uso del suelo se generó un mapa de distribución de las unidades de uso agropecuario de todo el estado (Figura 17). Ahí se observó que la mayor parte de la superficie del estado, 1,800,000 ha corresponde a este tipo de uso, lo que contribuye con una mayor presión hacia las áreas forestales del estado. Aunado a esto se observa que las actividades agropecuarias han fragmentado mucho la vegetación natural, y en ocasiones, como en el Valle de

Tehuacán, se puede apreciar que la vegetación es mas susceptible a esta fragmentación porque esta constituida principalmente por vegetación desértica.

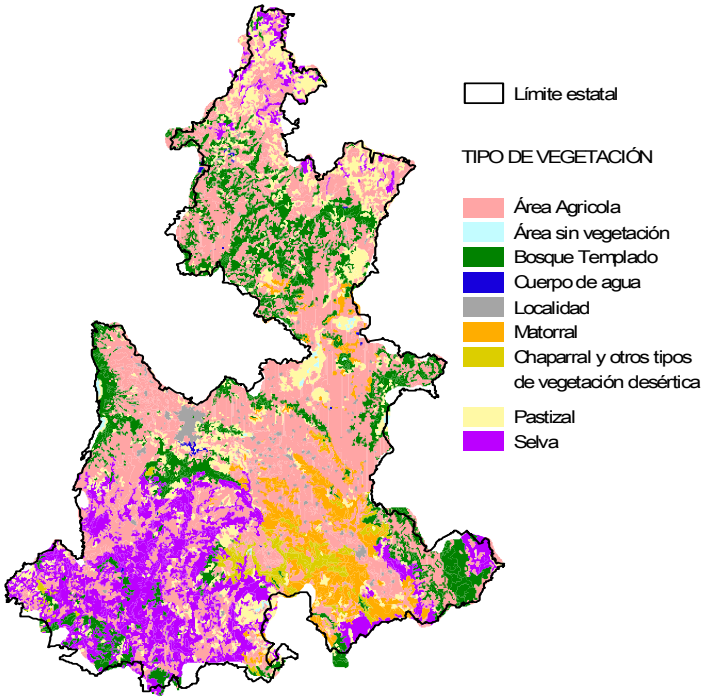


Figura 17. Uso del suelo y vegetación de Puebla, México.

Con el mapa base de tipos de vegetación (Figura 17), se procedió a extraer la información de área, perímetro y fragmentación dentro de cada unidad de muestreo, esto logrado a través de la agrupación de usos de suelo (agricultura y ganadería), la cual se ejemplifica en la Figura 9 y fue concentrada (Anexo 1).

5.4. Variables Sociales

Como las variables sociales son difíciles de representar cartográficamente, en este caso la estadística censal (INEGI, 2005) fue procesada y generada como un mapa donde se representaba cada comunidad por medio de un punto en el cual fueron concentradas las variables de población total y población analfabeta (Figura 18).

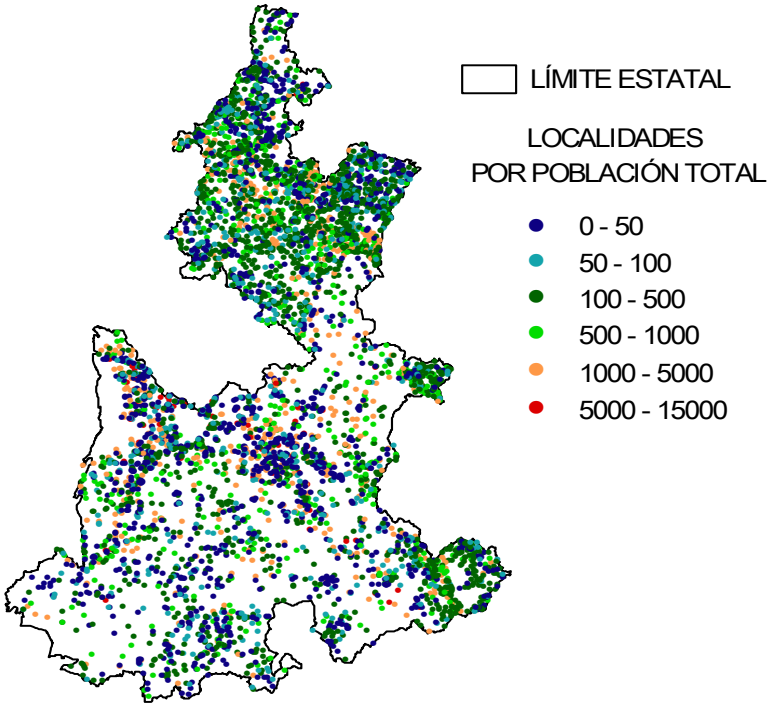


Figura 18. Comunidades rurales de Puebla, México.

La información se concentró en una base de datos (Anexo 2), de las cuales se seleccionó a la población total y el nivel de alfabetización como variables que presentaban más relación con la ocurrencia de incendios forestales en Puebla, para posteriores investigaciones se pueden probar alguna otra variable incluidas en la base de datos de esta investigación. Obtenidas las variables de interés se colocaron en el formato de concentración (Anexo 1) para su posterior utilización en el análisis estadístico.

El formato de concentración está conformado por 13 variables independientes (temperatura media anual, precipitación media anual, exposición del terreno, pendiente del terreno, perímetro de área agropecuaria, área agropecuaria, fragmentación de áreas agropecuarias, población total rural, población

analfabeta, longitud de vías de comunicación, número de ramales de vías de comunicación, numero de comunidades y altitud) y una dependiente (presencia de puntos de calor), como se muestra en el Anexo 1.

5.5. Análisis estadístico

Se aplicaron análisis de regresión logística utilizando más de 20 modelos distintos, con el objetivo de determinar los más significativos. Finalmente, se excluyeron las variables: temperatura media anual “Tma”, Pendiente “Pen”, Altitud “Alt”, Perímetro de uso agropecuario “Pea”, Área de uso agropecuario “Ara”, Fragmentación de uso agropecuario “Fra”, Longitud de vías de comunicación “Lov”, Población total “Pob” y Población de analfabetas “Alf”, que no resultaron significativas en los modelos. Contrario a lo encontrado por: Rodríguez *et al.* (2011), en cuanto al perímetro de áreas agropecuarias; Ávila *et al.* (2010), con respecto a temperatura; Rodríguez *et al.* (2008), con relación a nivel de alfabetización y áreas perturbadas; Román y Martínez (2006), relacionando extensión de tierras agrícolas y densidad de caminos; y Muñoz *et al.* (2005), referente a temperatura media máxima mensual, distancia a caminos y poblados.

Fue elegido un modelo con cuatro variables de interés que resultaron significativas: precipitación media anual (pma) con p=0.0035, exposición del terreno (xpo) con p=0.0059 y número de ramales de vías de comunicación (rav) con p=0.0011, tuvieron correlación positiva con respecto a la probabilidad de peligro de incendios forestales. La variable número de comunidades o localidades rurales, las cuales son las que tienen una población <15,000

habitantes (noc) con p=0.0017, esta expresó una correlación negativa. En el mismo orden, los intervalos de confianza para las variables independientes significativas, fueron: 1.001 a 1.003; 1.338 a 5.665; 1.022 a 1.090 y 0.845 a 0.962, respectivamente. El modelo tuvo una concordancia de 76.6% y discordancia de 23.3% (Anexo 3). Además de que este modelo general clasificó correctamente el 60% de todas las observaciones (Cuadro 7).

Cuadro 7. Resultados de Clasificación para construcción del modelo general.

FRECUENCIA/ % OBSERVACIONES	PREDICHO NO INCENDIO	PREDICHO INCENDIO
OBSERVADO NO INCENDIO	46 54.11%	2 2.35%
OBSERVADO INCENDIO	32 37.65%	5 5.88%

Fuente: Hosmer y Lemeshow (2000).

Por lo que la probabilidad de que ocurra al menos un incendio en cualquier unidad en Puebla, puede estimarse mediante la ecuación (2).

$$P = \frac{1}{\left(1 + e^{-(-6.2104 + 0.00169(pma) + 1.0127(xpo) + 0.0539(rav) - 0.1035(noc))}\right)} \ldots.(2)$$

Dónde: $P =$ probabilidad de peligro de incendios forestales, $e =$ número de Euler (2.7183), pma= precipitación media anual en milímetros, xpo= orientación de la pendiente en norte (0) o sur (1), rav= número de ramales de vías de comunicación y noc= número de comunidades.

Muñoz *et al.* (2005) contemplan a la exposición del terreno como parte de las condiciones meteorológicas que reciben un 60% de importancia en el peligro de incendios forestales, lo que fue confirmado en esta investigación, ya que la exposición del terreno es la variable que posee un mayor coeficiente en la regresión (1.0127), además de que otros autores la han utilizado en sus investigaciones con buenos resultados para predecir la ocurrencia de incendios forestales (Vega *et al.*, 1999; Rodríguez, 1996; Chou *et al*., 1990; Chuvieco y Martín, 2004). Cabe destacar que el coeficiente no es el único indicador de importancia en la ecuación, hay que contemplar la naturaleza de la variable, ya que depende si es continua o discreta y además de los valores que puedan tomar estas, para influir en la probabilidad de incendios forestales.

El número de comunidades es el segundo en importancia dentro de la probabilidad de incendios forestales para Puebla, con una relación inversa. En cambio, otros autores (Martell *et al*., 1987; Todd y Kourtz, 1991) mencionan que entre más cercanas estén las comunidades rurales mayor la presencia de incendios forestales y Muñoz *et al.* (2005), lo consideran como parte del factor socioeconómico contemplando un 15% de importancia y colocándolo como el tercer componente del peligro de incendios forestales. Para el caso del número de ramales de vías de comunicación, con correlación positiva, Román y Martínez (2006) y Muñoz *et al.* (2005) confirman lo encontrado en esta investigación, hallando que la densidad de caminos y su proximidad se relacionan positivamente con el número de incendios forestales.

El coeficiente más bajo es el de la precipitación media anual, con signo positivo, lo que está relacionado a la productividad vegetal y disponibilidad de combustibles forestales, confirmando lo expuesto por Ávila *et al.* (2010), quienes encontraron que las variaciones climáticas (precipitación) incrementan la probabilidad de ignición, además Muñoz *et al.* (2005), mencionan que las condiciones meteorológicas incluyendo a la precipitación, recibieron un 60 % de importancia. Drury y Veblen (2008) relacionan las variaciones extremas del clima con la ocurrencia de incendios forestales, además de otros autores (Vega *et al.*, 1999; Chou *et al*., 1990 y Chuvieco y Martín, 2004).

La representación gráfica del modelo logístico general se encuentra en la Figura 19, contemplando cuatro intervalos de precipitación: el 37.9% de la superficie estatal se encuentra con precipitaciones entre 0 y 700 mm, siguiendo el comportamiento de la figura 19a, en cambio, el 46.8% está entre 700 y 1500 mm (Figura 19b), el 8.0% entre 1500 y 2500 mm (Figura 19c), y el 7.3% supera los 2500 mm (Figura 19d), dos exposiciones, cuatro niveles de vías de comunicación y cuatro niveles de número de comunidades en las cuales es posible observar el comportamiento del modelo con respecto a las condiciones de Puebla.

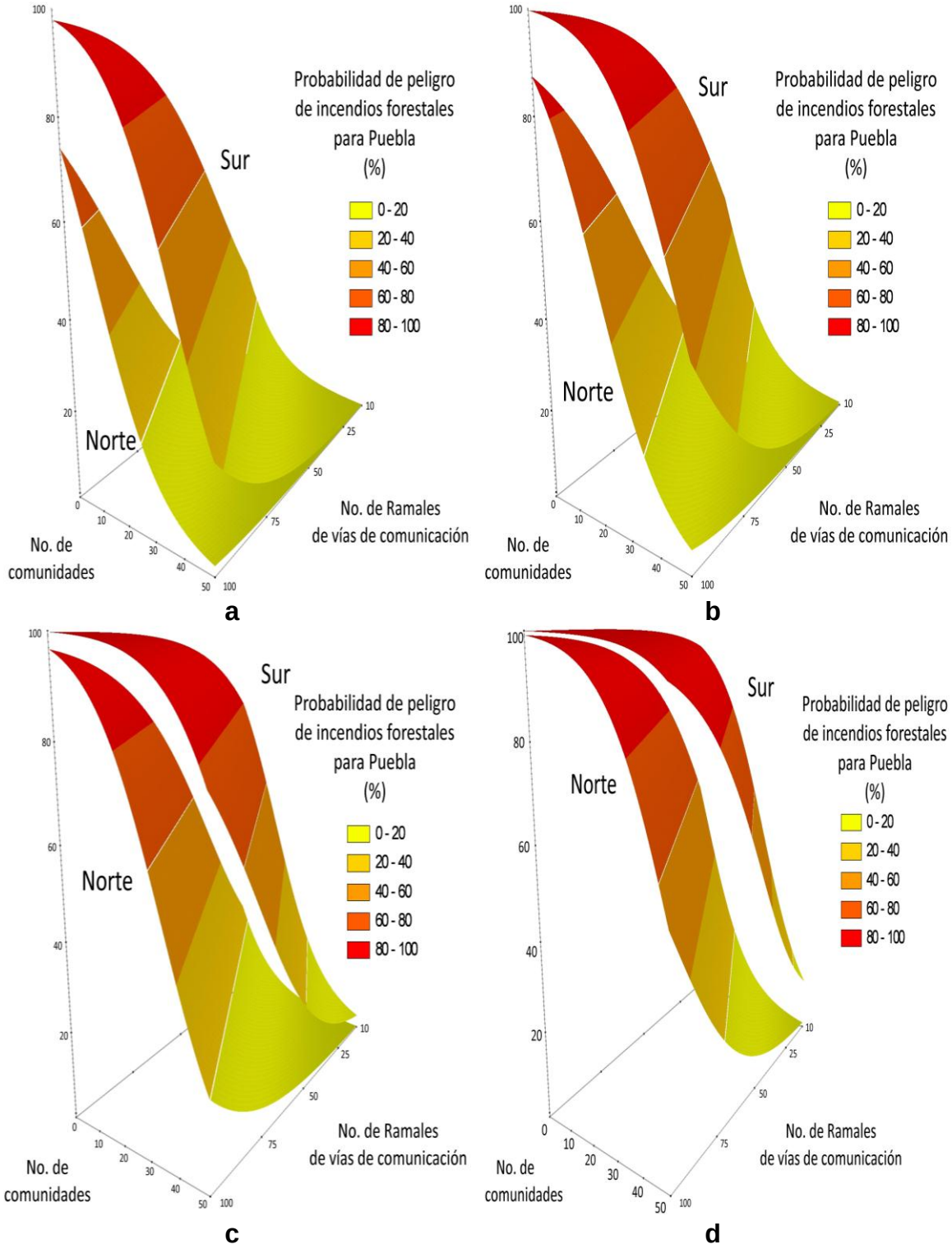


Figura 19. Representación gráfica del modelo logístico general de Puebla para cuatro diferentes precipitaciones medias anuales (Pma).
a) Pma=400 mm, **b)** Pma=1,000 mm, **c)** Pma=2,000 mm, **d)** Pma=3,000 mm.

Se observa cómo los signos de los coeficientes son lógicos, esperándose una ocurrencia mayor en regiones con baja densidad de localidades, un número mayor de ramales de vías de comunicación, en exposiciones sur y a precipitaciones mayores representando lugares con mayor productividad agropecuaria, más carga de combustibles, y por ende más susceptible a incendios (Figura 19 a). Como el ajuste realizado es bueno, se comprobó que un valor alto de probabilidad se asoció con presencia real de incendios forestales.

En el caso opuesto esperándose una ocurrencia menor en regiones con alta densidad de localidades, número menor de ramales de vías de comunicación, en exposiciones norte y a precipitaciones menores representando lugares con menor productividad agropecuaria, menor carga de combustibles, y por ende menos susceptible a incendios (Figura 19 d).

Para confirmar la validez de los resultados, se aplicó el modelo a 30 diferentes datos. Se calculó una tabla de clasificación (Vega *et al.*, 1999) para la validación. El modelo clasificó correctamente el 65.0% de todas las observaciones, el 53.8% de las observaciones con incendios y 85.7% de las observaciones sin incendios (Cuadro 8).

Cuadro 8. Resultados para validar el modelo general con datos diferentes.

FRECUENCIA/ % OBSERVACIONES	PREDICHO NO INCENDIO	PREDICHO INCENDIO
OBSERVADO NO INCENDIO	6 85.7%	1 14.3%
OBSERVADO INCENDIO	6 46.2%	7 53.8%

Fuente: Hosmer y Lemeshow (2000).

5.6. Mapa de Peligro de Incendios Forestales en Puebla.

Una vez verificada la validez del modelo, se aplicó a todo el estado generándose un mapa que expresa, en una escala probabilística el grado de peligro desde la categoría mínimo, pasando por bajo, medio, alto y extremo dando como resultado que el estado cuente con regiones de alta incidencia de incendios forestales (Figura 20).

El mayor peligro se encuentra en tres zonas: al norte del estado donde se localiza parte de la Sierra Norte de Puebla; en el poniente donde colinda con Tlaxcala y en el sureste colindando con Veracruz, donde se registran el mayor número de ramales y menor número de comunidades, con respecto a otros lugares, que favorecen la presencia de incendios.

La menor incidencia de incendios también se encuentra en tres zonas: la parte central por la capital del estado, la parte nororiente colindando con el estado de México y una pequeña parte en el suroeste del estado, esto por la poca presencia de caminos y comunidades.

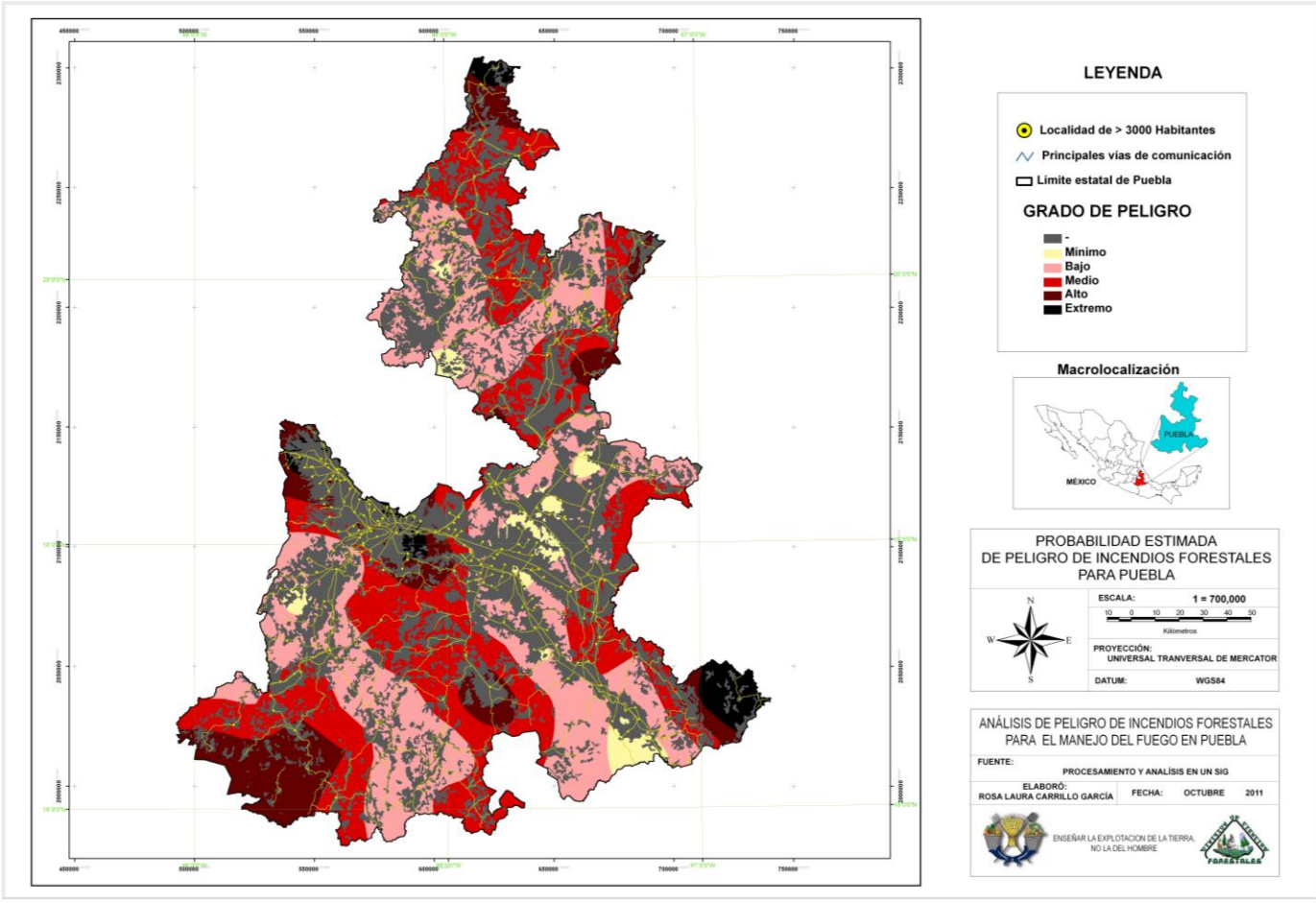


Figura 20: Probabilidad Estimada de Peligro de Incendios Forestales para Puebla.

En el Cuadro 9 se resumen los grados de peligro de incendios forestales de Puebla, tomando en cuenta la superficie en hectáreas que se encuentra en cada intervalo de peligro y su porcentaje con respecto a la superficie forestal del estado.

Cuadro 9. Superficie con respecto a grados de peligro de incendios forestales para Puebla, México.

Grado de peligro	Probabilidad de ocurrencia	Superficie (Ha)	% *
-	Cuerpo de agua	4,570	0
-	Zona Urbana	47,186	0
-	Agricultura	1,436,769	0
Mínimo	0.00 - 0.20	74,060	3.89
Bajo	0.20 - 0.40	730,453	38.38
Medio	0.40 - 0.60	746,405	39.21
Alto	0.60 - 0.80	315,389	16.57
Extremo	0.80 - 1.00	37,067	1.95
Superficie forestal		**1,903,374**	**100**
Superficie estatal		**3,391,900**	

***** Con respecto a superficie forestal, eliminando áreas agrícolas, cuerpos de agua y ciudades.

El 42.3% de la superficie forestal de Puebla se encuentra calificada como mínimo a bajo grado de peligro, lo que representa que el 57.7 % corresponde a valores que se encuentran entre medio, alto y extremo grado de peligro. Tan solo el 3.9% se encuentra clasificado como grado mínimo, en contraste existe un 16.6 % clasificado como alto y un 1.9% en extremo grado de peligro para Puebla (Figura 21).

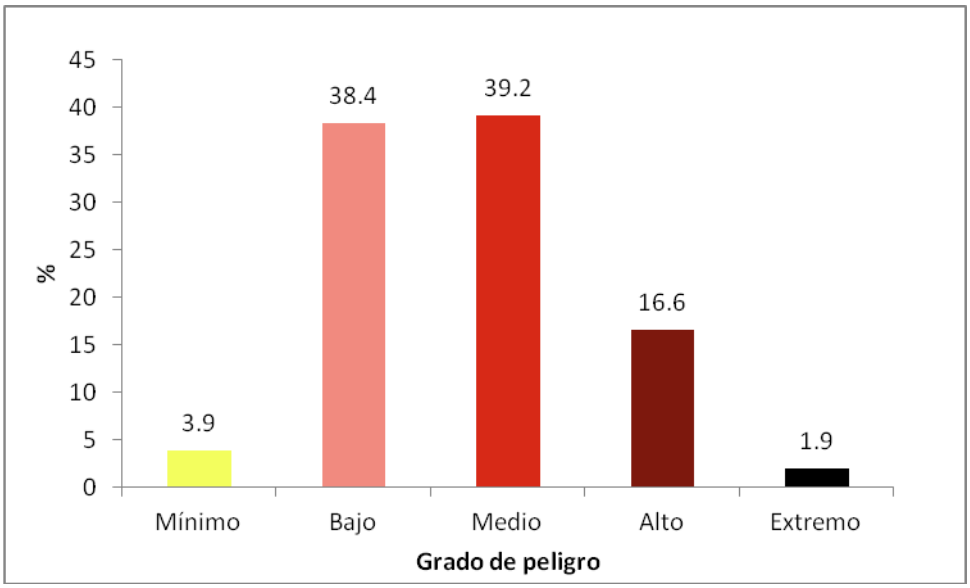


Figura 21: Grado de Peligro de Incendios Forestales para Puebla.

Para complementar el análisis se generaron dos cuadros que permitieron observar el grado de peligro con respecto a los diferentes tipos de vegetación presente en Puebla, para identificar que ecosistema es más susceptible a presentar incendios forestales. El cuadro 10 presenta la superficie del estado y la distribución de la vegetación en los diferentes grados de peligro y el cuadro 11 muestra el porcentaje con respecto a la superficie forestal de tipos de vegetación distribuida en los diferentes grados de peligro.

Cuadro 10. Superficie con respecto a grados de peligro por tipo de vegetación para Puebla, México.

Tipo de vegetación	Grado de peligro						Total por tipo de vegetación
	- -	Mínimo 0.0 - 0.2	Bajo 0.2 - 0.4	Medio 0.4 - 0.6	Alto 0.6 - 0.8	Extremo 0.8 - 1.0	
Bosque cultivado					178	169	348
Bosque de encino		1817	31547	66397	51756	256	151774
Bosque de encino-pino		538	11997	4466	2055	54	19110
Bosque de oyamel		79	2094	10587	4007		16767
Bosque de pino		12087	77307	50572	28923	1014	169903
Bosque de pino-encino		6323	66919	48677	11630		133549
Bosque de táscate		1300	8275	3256	253		13084
Bosque mesófilo de montana		849	34506	35054	10936	15822	97166
Chaparral		1816	20559	29905	13462		65742
Cuerpo de agua	4570						4570
Matorral crasicaule		16228	53178	22089	252		91748
Matorral desértico rosetófilo		9090	71466	49744	1713		132013
Mezquital			3565	135			3700
Sin Vegetación		237	5029	3298	1205		9769
Palmar			1308	10360	7148		18816
Pastizal		16592	120223	159893	73107	3192	373006
Pradera de alta montana			679	3511	667		4856
Selva alta perennifolia			3819	23557	16690	16560	60626
Selva baja caducifolia		7104	217799	224905	90907		540715
Selva baja espinosa					501		501
Selva mediana subcaducifolia			16				16
Tular			167				167
Zona Urbana	47186						47186
Agrícola		1436769					1436769
Grado de peligro	**51756**	**1510830**	**730453**	**746405**	**315389**	**37067**	**3391900**

Cuadro 11. Porcentaje con respecto a grados de peligro por tipo de vegetación para Puebla, México.*

Tipo de vegetación	Grado de peligro					% Por tipo de vegetación
	Mínimo 0.0 - 0.2	Bajo 0.2 - 0.4	Medio 0.4 - 0.6	Alto 0.6 - 0.8	Extremo 0.8 - 1.0	
Bosque cultivado	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02
Bosque de encino	0.10	1.66	3.49	2.72	0.01	7.97
Bosque de encino-pino	0.03	0.63	0.23	0.11	0.00	1.00
Bosque de oyamel	0.00	0.11	0.56	0.21	0.00	0.88
Bosque de pino	0.64	4.06	2.66	1.52	0.05	8.93
Bosque de pino-encino	0.33	3.52	2.56	0.61	0.00	7.02
Bosque de tascate	0.07	0.43	0.17	0.01	0.00	0.69
Bosque mesofilo de montana	0.04	1.81	1.84	0.57	0.83	5.10
Chaparral	0.10	1.08	1.57	0.71	0.00	3.45
Matorral crasicaule	0.85	2.79	1.16	0.01	0.00	4.82
Matorral desertico rosetofilo	0.48	3.75	2.61	0.09	0.00	6.94
Mezquital	0.00	0.19	0.01	0.00	0.00	0.19
Sin Vegetación	0.01	0.26	0.17	0.06	0.00	0.51
Palmar	0.00	0.07	0.54	0.38	0.00	0.99
Pastizal	0.87	6.32	8.40	3.84	0.17	19.60
Pradera de alta montana	0.00	0.04	0.18	0.04	0.00	0.26
Selva alta perennifolia	0.00	0.20	1.24	0.88	0.87	3.19
Selva baja caducifolia	0.37	11.44	11.82	4.78	0.00	28.41
Selva baja espinosa	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.03
Selva mediana subcaducifolia	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Tular	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
% Por grado de peligro	**3.89**	**38.38**	**39.21**	**16.57**	**1.95**	**100.00**

* El porcentaje es con respecto a la superficie forestal, eliminando áreas agrícolas, cuerpos de agua y ciudades.

6. CONCLUSIONES

La profundización en el conocimiento de la distribución del peligro de incendios forestales en el estado de Puebla puede contribuir en la planeación de estrategias de prevención, control y combate de incendios forestales de forma que los recursos destinados para esta actividad sean dirigidos a las zonas donde se espera un mayor peligro.

La metodología empleada demostró requerir de una operación sencilla y con resultados robustos para la estimación de la probabilidad de peligro de incendios forestales, por lo que puede ser aplicada en otros estados de la República Mexicana. Además de que las fuentes de datos obtenidas para constituir este modelo son accesibles a los investigadores.

El modelo de regresión logística es muy eficaz para el estudio de variables que explican los riesgos naturales, además de poder introducir variables que tengan que ver con densidad, distribución y no sólo con proximidad.

Se desarrolló satisfactoriamente el modelo de regresión logística para estimar el peligro de incendios en Puebla demostrando que las variables de carácter socio-económico tienen un gran peso en la probabilidad de peligro de incendios forestales en Puebla, lo que resulta de interés para considerar al factor humano en la planificación de las labores de gestión y protección contra incendios en el estado.

Tomando en cuenta que el 57.73 % corresponde a valores que se encuentran entre medio, alto y extremo grado de peligro, esas áreas son de interés en la implementación de estrategias de manejo para reducir ese peligro. Priorizando las áreas con alto y extremo grado de peligro las cuales alcanzan un 18.52 % con una superficie de 352,456 ha.

La vegetación más susceptible a presentar incendios forestales son: Selva baja caducifolia, pastizal y bosque de encino con un 4.78%, 4.0% y 2.73% de la superficie forestal del estado respectivamente, los cuales están clasificados de alto a extremo grados de peligro.

7. RECOMENDACIONES

Generar un plan de acción para el manejo del fuego en Puebla con los elementos encontrados en esta investigación, incluyendo estrategias a corto, mediano y largo plazo para la prevención, combate, control y extinción de los incendios forestales fomentando a su vez el uso del fuego como herramienta para este fin.

Es recomendable realizar nuevas investigaciones para aplicar la metodología utilizada en este estudio para zonas a escalas más grandes y para contemplar nuevas variables de carácter socio-económico.

Generar un sistema de información geográfica donde se recabe toda la información de la problemática de incendios forestales de Puebla para que esté al alcance de todas las instancias que requieran saber la situación de los incendios forestales y puedan prever los mismos.

Finalmente, es de relevancia la incorporación de nuevas variables y también de mejorar las fuentes de información. Además de considerar que para tener un sistema completo de prevención de incendios se debe contar con índices de peligro que consideren dos componentes: la probabilidad de que se produzca el evento y el daño potencial del mismo.

8. LITERATURA CITADA

Abhineet, J., S. A. Ravan, R. K. Singh, K.K. Das y P.S. Roy. 1996. Forest fire risk modelling using remote sensing and geographic information system. Current Science. 70: 928-933 p.

Agresti A. 1990. Categorical data analysis. John Wiley & Sons. United States of America. 558 p.

Ahmad, W. y K. McDougall. 1992. Application of spatial technologies for modelling bushfire risk in Australia, 6th Australasian Remote sensing conference, Wellington. New Zealand. 174-182 p.

Andrews, P., M. Finney y M. Fischetti. 2008. Predicting wildfires. Scientific American. 297 (2). 33-39 p.

Aronnoff, S. 1989. Geographic Information Sistems: A management perspective. Otawa, WDL.

AutoCad. 2004. Programa para microcomputadoras. Version 2004. Autodesk, Inc.

Ávila F., D., M. Pompa G., X. Antonio N., D. A. Rodríguez T., E. Vargas P. y J. Santillán P. 2010. Driving Factors for Forest Fire Occurrence in Durango State of Mexico: A Geospatial Perspective. Chin. Geogra. Sci. 20(6) 491-498 p.

Bautista Z., F., H. Delfín G., J. L. Palacio P. y M. C. Delgado C. 2004. Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales. Universidad Nacional Autónoma de México. Mexico, D.F. 507 p.

Carvacho, L. 1998. Evaluación de la estimación de grandes incendios forestales en la cuenca mediterránea europea por redes neuronales y regresión logística. Serie Geográfica. 7: 73-85 p.

Chou H. Y., Minnich R. A., Salazar L. A., Power J. D., Dezzani R. J. 1990. Spatial autocorrelation of wildfire distribution in the Idyllwild

Quadrangle, San Jacinto Mountains, California. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 56, 1507-1513 p.

Chou Y.H., Minnich R. A., Chase R. A. 1993. Mapping probability of fire occurrence in San Jacinto Mountains, California, USA. Environmental Management 17(1), 129-140 p.

Chuvieco S., E. y R. G. Congalton. 1989. Application of remote sensing and Geographic Information Systems to Forest fire hazard mapping. Remote Sensing of Environment. 29: 147-159 p.

Chuvieco S., E. y M. Martín. 1995. Fundamentos de Teledetección Espacial. Ediciones Rialp, S. A. Madrid, España. 375-400 p.

Chuvieco S., E., P. Martín, J. Martínez, J. Salas. 1998. Geografía e Incendios Forestales. Serie Geográfica. 7: 11-17 p.

Chuvieco S., E. y M. Martín I. 2004. Nuevas Tecnologías para la estimación del riesgo de incendios forestales. Instituto de Economía y Geografía. Madrid, España. 190 p.

CONABIO. 2010. Programa para la detección de puntos de calor mediante técnicas de percepción remota. Monitoreo de puntos de calor de la CONABIO. http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/puntos_calor/doctos/puntos_calor.html. Consultado: 8/03/2010.

CONAFOR. 2011. Estadísticas de incendios forestales de México. http://148.223.105.188:2222/gif/snif_portal/index.php?option=com_content&task=view&id=44&Itemid=54. Consultado: 12/03/2010.

Donoghue, L. R. y W. A. Main. 1985. Some Factors Influencing Wildfire Occurrence and Measurement of Fire Prevention Effectiveness. Journal of Environmental Management, 20: 87-96 p.

Drury S. A., T. Veblen T. 2008. Spatial and temporal variability in fire occurrence within the Las Bayas Forestry Reserve, Durango, Mexico. Plant Ecology, 197(2): 299–316 p. DOI: 10.10- 07/s11258-007-9379-5

ESRI, 2006. Environmental Systems Research Institute, Inc. Redlands, CA. 92373. USA.

European Commission (EC). 2010. Joint Research Centre. http://ec.europa.eu/dgs/jrc/index.cfm. Consultado: 17/03/2010.

Excel. 2007. Paquetería Microsoft Office para microcomputadoras. Microsoft Cor.

Flores G., J. G., D. A. Rodríguez T., O. Estrada M., y F. Sánchez Z. 2006. Incendios Forestales: definiendo el problema, ecología y manejo, participación social, fortalecimiento de capacidades, educación y divulgación. Mindi-prensa. México, D. F. 254 p.

García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México. 91 pp.

Gómez D., M. y J. I. Barredo C. 2006. Sistemas de Información Geográfica y evaluación en la ordenación del territorio. 2da edición. Alfaomega. México, D. F. 280 p.

Gómez J. D., A. I. Monterroso and J. A. Tinoco. 2007. Distribución del cedro rojo (*Cedrela odorata*) en el estado de Hidalgo, bajo condiciones actuales y escenarios de cambio climático. Madera Bosques 13, 29-49 p.

Gómez, J.D., J. Etchevers, A. Monterroso, C. Gay, J. Campo y M. Martinez. 2008. Spatial estimation of mean temperature and precipitation in areas of scarce meteorological information. Atmósfera 21(1): 35-56 p.

Gómez D., J. D., A. I. Monterroso R., J. A. Tinoco R., M. L. Toledo M., C. Conde Á. y C. Gay G. 2011. Assessing current and potential patterns of 16 forest species driven by climate change scenarios in México. *Atmósfera.* 24(1), 31-52 p.

Goodchild, M. 2000. New horizons for the social sciences: geographic information systems en Social Sciences for Digital Wold: Building infraestructura and Databases for the Future. Organization for Economic Coorporation and Development, Paris, 163-172 p.

Hosmer, D. W. y S. Lemeshow. 2000. Applied logistic regression. John Wiley & Sons. New York. 392 p.

INEGI. 2005. Programa Conteo 2005. México. http//: www.inegi.com.mx. Consultado: 4/11/2009.

INEGI, 2006a. Cartografía de uso de suelo y vegetación. Serie III. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México.

INEGI, 2006b. Cartografía de vías de comunicación. Serie III. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México.

INEGI. 2007. Censo agropecuario del estado de Puebla. México. http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/agro/default.aspx. Consultado: 11/11/2009.

INEGI, 2010. Continuo de elevaciones mexicano. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. http//: www.inegi.com.mx. Consultado: 15/03/2010.

Infante G., S. y G. P. Zarate de L. 2003. Métodos Estadísticos: un enfoque interdisciplinario. Trillas. México, DF. 643 p.

Jiménez, R., I. Cruz, M. Schmith, R. Ressl, S. Ressl, G. López y E. Muñoz. 2007. Programa para detección de puntos de calor mediante técnicas de percepción remota. Instituto Nacional de Ecología. México, DF. http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/507/cap5.html. Consultado: 17/05/2011.

Loftsgaarden D. O., Andrews P. L. 1992. Constructing and testing logistic regression models for binary data: Aplications to the National Fire Danger Rating System. USDA Forest Service, Intermountain Research Station, General Technical Report INT-286, 36 p.

Marín T., M, J. López Z. y C. Musalem J. 2009. *Enciclopedia de los Municipios de México: Estado de Puebla.* Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. Puebla. http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/puebla/. Consultado: 19/04/2010.

Martell D. L., Otukol S., Stocks B. J. 1987. A logistic model for predicting daily people-caused fire occurrence in Ontario. Canadian Journal of Forest Research. 17, 394-401 p.

Martínez, J., J. Martínez y M. P. Martín. 2003. El factor humano en los incendios forestales: análisis de factores socioeconómicos relacionados con la incidencia de incendios forestales en España, en Chuvieco, E. y Martín, M.P. (eds), Nuevas tecnologías para la estimación del riesgo de incendios forestales, CSIC, Madrid.

Martínez F., J. 2004. Analysis, estimation and mapping of the human risk of forest fires. Doctoral Thesis. Alcala de Henares, Spain: University of Alcala, 337 p.

Martínez F., J., M. P. Martín, R. Romero, J. Martínez, P. Echavarría. 2005. Aplicación de los SIG a los modelos de riesgo de incendios forestales: Riesgo humano a escala regional, en Gurría Gascón, J.L., Hernández Carretero, A., Nieto Masot, A. (Eds.): De lo local a lo global: nuevas tecnologías de la información geográfica para el desarrollo. Servicio de Publicaciones Universidad de Extremadura, 329-345 p.

Montgomery D. C. 2004. Diseño y análisis de experimentos. Limusa. Mexico, DF. 686 p.

Moral P., I. 2006. Modelos de regresión: lineal simple y regresión logística. http://www.seden.org/files/14-CAP%2014.pdf. Consultado: 8/03/2010.

Muñoz, C. A., E. J. Treviño, J. Verástegui, J. Jiménez y O. A. 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 p.

Pew, K.L., C. P. S. Larsen. 2001. GIS analysis of spatial and temporal patterns of humancaused wildfires in the temperate rain forest of Vancouver Island, Canada. Forest Ecology and Management, 140, 1-18 p.

Phillips C., Nickey B. 1978. The concept of "Spatial Risk" and its application to Fire Prevention. Fire Management Notes, 39(4), 7-8,19 p.

Rentería A., J. B. 2004. Development of models for fuel control in the management of forest ecosystems in Durango. Mexico: University of Nuevo Leon. 125 p.

Rodríguez T., D. A. 1996. Incendios Forestales. Mundi-Prensa. México, D.F. 630 p.

Rodríguez T., D. A., H. Ramírez M., H. Tchikoué y J. Santillán P. 2008. Factores que inciden en la siniestralidad de los incendios forestales. Ciencia Forestal. México. 33(104). 27-58 p.

Rodríguez T., D. A., H. Tchikoué, C. Cíntora G., R. Contreras A., A. de la Rosa V. 2011. Combustibles forestales, peligro de incendio y áreas prioritarias de protección en las zonas afectadas por el Huracán Dean. Agrociencia (en prensa).

Román C., R, M. J. Martinez V. 2006. Effectiveness of protected areas in mitigating fire within their boundaries: Case study of Chiapas, Mexico. Conservation Biology, 20(4): 1074–1086 p.

Rzedowski J. 1986. Vegetación de México. Limusa. México, 432 p.

Santillán P., J. 1993. Sistema para determinar indicadores de peligro de incendio forestal. Informe Técnico No 14. Acuerdo de Cooperación en Materia Forestal entre México y Finlandia. México. 24 p

SMN. 2000. Normales climatológicas de la República Mexicana. Servicio Meteorológico Nacional. México.

Statistical Analisys System (SAS). 2002. Programa para microcomputadoras version 9.0 SAS Institute Inc.

Surfer. 1999. Programa para microcomputadoras, versión 7.00. Golden Software, Inc.

Todd B. y H. Kourtz P. 1991. Predicting the daily occurrence of people-caused forest fires. Forestry Canada, Petawawa National Forestry Institute, Chalk River, Ontario, Canada. Information Report PI-X-103, 16 p.

Van Wagner C.E, 1987. Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Government of Canada, Canadian Forestry Service, Ottawa, Ontario, Canada. Forestry Technical Report n. 35, 36 p.

Vega G., C., Woodard P. M., Lee B. S. 1993. Geographic and temporal factors that seem to explain human-caused fire occurrence in Whitecourt Forest, Alberta. In: Proceedings GIS'93 Symposium, Vancouver, British Columbia, Canada. Feb 1993, 1: 115-119 p.

Vega G., C. 1994. Predicting human-caused forest fire occurrence in Whitecourt Forest, Alberta. M.Sc Thesis. University of Alberta, Edmonton, Canada. 117 p.

Vega G., C., Woodard, P. M., Titus, S. J., Adamowicz, W. L. y Lee, B. S. 1999. Dos modelos para la predicción de incendios forestales en Whitecourt Forest, Canada. Investigación Agricola: Sistema de Recursos Forestales. 8(1) 19 p.

Vélez, R. 2000. La defensa contra incendios forestales. Fundamentos y experiencias. Ed. 1°. ISBN: 9788448127428. Madrid. 1320 p.

Vilar del Hoyo, L., M. P. Martín y J. Martínez. 2008. Empleo de regresión logística para la obtención de modelos de riesgo humano de incendios forestales. Boletín de la Asociación de Geográfos Españoles, N° 47, 5-29 p.

Vliegher, B. M. D. 1992. Risk assessment for environmental degradation caused by fires using remote sensing and GIS in a Mediterranean Region (South-Euboia, Central Greece), IGARSS'92. INt. Geoscience and Remote Sensing Symposium, Houston, TX.: 44-47 p.

Vliegher, B. M. D., Dapper, M. D. y Bazigos, P.S. 1993. Assessment of fire risk in forests and grazing lands using multi source data. An example for SW-Messinia, Greece, International Symposium Operationalization of Remote Sensing. Enschede. The Netherlands. ITC: 75-86 p.

Wells, G. 2008. The Rothermel FIRE-Spread Model: Still Running Like a Champ. Fire Science Digest: Research supporting sound decisions. Estados Unidos. ISSUE 2(march 2008). 12 p.

WMO, 2007. Base de datos climatológica CLICOM. World Meteorological Organization. México.

Yang J., He H S, Shifley S R. 2007. Spatial patterns of modern period human-caused fire occurrence in the Missouri Ozark Highlands. Forest Science, 53(1): 1–15 p.

Zamudio S., J. F y A. A. Alvarado S. 2000. Notas de Métodos Multivariados I. UACh-DICIFO. 223 p.

11. ANEXOS

ANEXO 1: Formato de concentración de datos para las variables de interés.

U_MU	TIPO DE VEG. GRAL	PMA	TMA	XPO (AZ)	PEN (%)	ALT	AGRICOLA (PEA)	AGRICOLA (ARA)	AGRICOLA (FRA)	LOV	RAV	POB	ALF	NOC	P_C
1	selva	1308.70	24.00	180	20	215.00	79.13	5488.74	7.00	124.45	50	2493	623	12	1
2	selva	1397.21	23.93	180	20	200.00	37.25	8597.91	12.00	62.25	25	3203	1087	10	1
.															
.															
.															
83	selva	848.30	22.89	180	20	1130.00	71.82	3176.37	9.00	77.24	21	1106	385	4	0
84	selva	757.93	23.24	180	20	1185.00	56.20	4232.31	7.00	58.5	16	3140	1481	16	0
85	selva	555.90	21.59	180	20	1370.00	57.86	4041.22	9.00	90.98	31	2409	969	5	0

ANEXO 2: Base de datos del mapa de comunidades rurales de Puebla.

VARIABLES	ABREVIATURA
Entidad	Nom_ent
Municipio	Nom_mun
Localidad	Nom_loc
Longitud	Long_decim
Latitud	Lat_decim
Población total	**P_total**
Población de hombres	P_mas
Población de mujeres	P_fem
Población de 0a 5 años	P_0a5
Población de 6 a 11 años	P_6a11
Población de 12 a 14 años	P_12a14
Población de 15 a 17 años	P_15a17
Población de 18 a 24 años	P_18a24
Población de 25 a 59 años	P_25a59
Población de 60 a 64 años	P_60a64
Población de mas de 65 años	P_mas65
Relación entre hombres y mujeres	Rel_h_m
Población residente al 2000	P_re2000
Población que emigro a otra localidad al 2000	P_oe2000
Población que emigro a E. U. al 2000	P_eu2000
Población analfabeta de 8 años y más	Panf8ymas
Población que no asiste a la escuela de 5 a 14 años	Pnae5a14años
Población mayor de 15 años que no asiste a la escuela	P15ymase
Población analfabeta	**Panf_5ymas**
Población de 15 a 24 años que asisten a la escuela	P_15a24a
Población mayor de 15 años con estudios básicos incompletos	P15ym_ebin
Población de mayor de 15 años con estudios básicos completos	P15ym_ebc
Población mayor de 15 años con estudios pos básicos	P15ymapb
Grado promedio de escolaridad	Graproes
Población de mas de 5 años con lengua indígena	P5ymahli
Población en hogares indígenas	P_hog_ind
Total de viviendas habitadas	T_vivhab

Fuente: Base de datos modificada de la estadística censal (INEGI, 2005).

ANEXO 3: Modelo General de Regresión Logística para la Estimación

Salida del Sistema SAS

Procedimiento LOGISTIC

Información del modelo

	WORK.LOGISTIC
Conjunto de datos	inc
Variable de respuesta	2
Número de niveles de respuesta	85
Número de observaciones	logit binario
Modelo	Puntuación de
Técnica de optimización	Fisher

Perfil de respuesta

Valor ordenado	inc	Frecuencia total
1	1	37
2	0	48

La probabilidad modelada es inc=1.

Estado de convergencia del modelo

Convergence criterion (GCONV=1E-8) satisfied.

Estadísticos de ajuste del modelo

Criterio	Sólo términos independientes	Términos independientes y Variables adicionales
AIC	118.407	107.875
SC	120.850	120.089
-2 LOG L	116.407	97.875

Prueba de la hipótesis nula global: BETA=0

Test	Chi-cuadrado	DF	Pr > ChiSq
Ratio de verosimilitud	18.5321	4	0.0010
Puntuación	16.3976	4	0.0025
Wald	13.0347	4	0.0111

Análisis del estimador de máxima verosimilitud

Parámetro	DF	Estimador	Error estándar	Chi-cuadrado de Wald	Pr > ChiSq
Intercept	1	-6.2104	1.9050	10.6279	0.0011
pma	1	0.00169	0.000579	8.5382	0.0035
xpo	1	1.0127	0.3682	7.5657	0.0059
rav	1	0.0539	0.0165	10.7327	0.0011
noc	1	-0.1035	0.0330	9.8396	0.0017

Continuación… .. ANEXO 3

Estimadores de cocientes de disparidad;

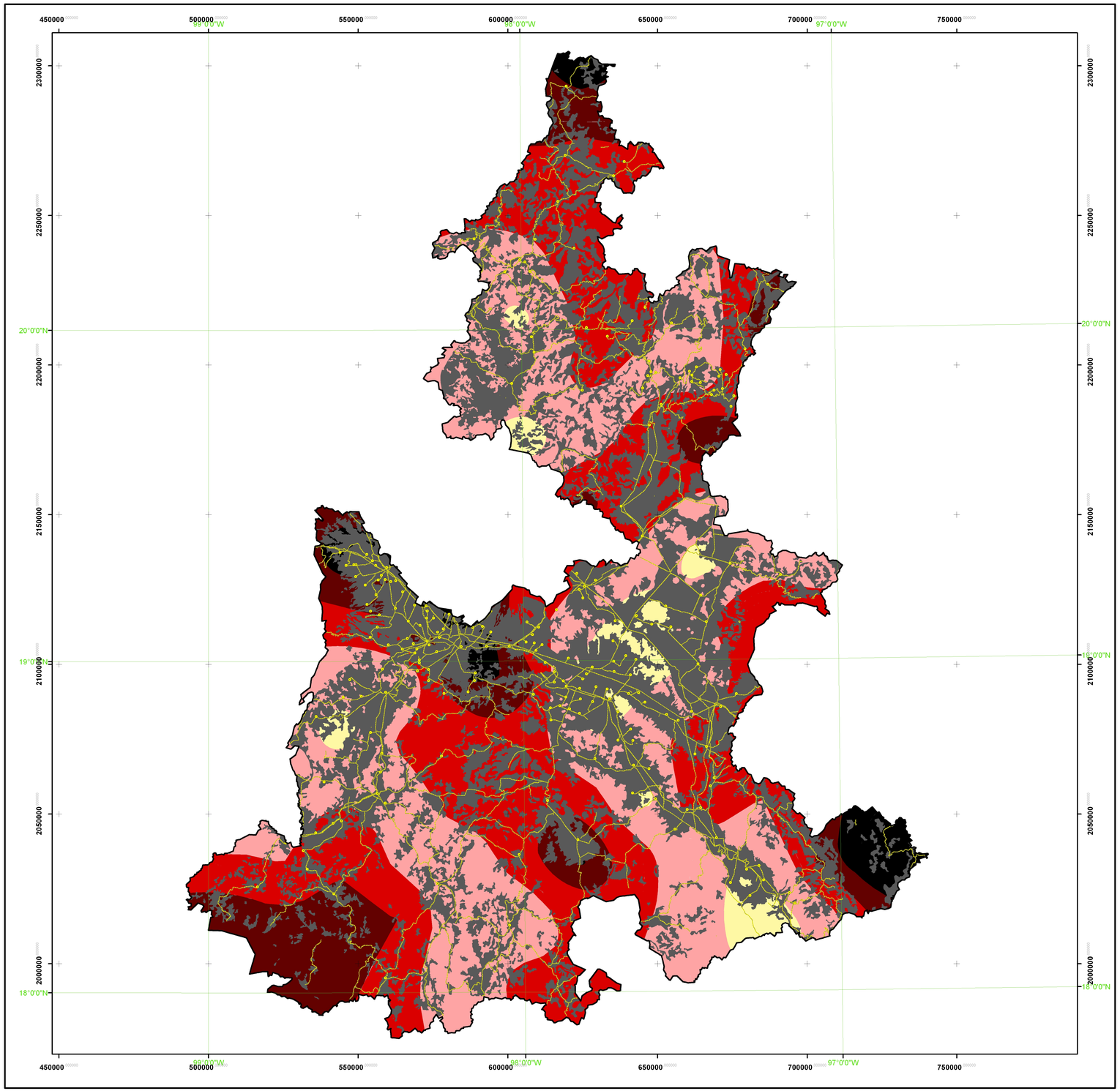
Efecto	Estimador del punto	95% Wald Límites de confianza	
pma	1.002	1.001	1.003
xpo	2.753	1.338	5.665
rav	1.055	1.022	1.090
noc	0.902	0.845	0.962

Asociación de probabilidades predichas y respuestas observadas

Concordancia de porcentaje	76.6	D de Somers	0.534
Discordancia de porcentaje	23.3	Gamma	0.534
Porcentaje ligado	0.1	Tau-a	0.266
Pares	1776	c	0.767

ANEXO 4:

MAPA DE PROBABILIDAD ESTIMADA EN GRADOS DE PELIGRO DE INCENDIOS FORESTALES PARA PUEBLA.



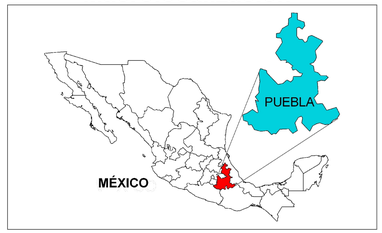
LEYENDA

- Localidad de > 3000 Habitantes
- Principales vías de comunicación
- Límite estatal de Puebla

GRADO DE PELIGRO

- -
- Mínimo
- Bajo
- Medio
- Alto
- Extremo

Macrolocalización



PROBABILIDAD ESTIMADA DE PELIGRO DE INCENDIOS FORESTALES PARA PUEBLA

N W E S

ESCALA: 1 = 700,000

10 0 10 20 30 40 50

Kilómetros

PROYECCIÓN: UNIVERSAL TRANVERSAL DE MERCATOR

DATUM: WGS84

ANÁLISIS DE PELIGRO DE INCENDIOS FORESTALES PARA EL MANEJO DEL FUEGO EN PUEBLA

FUENTE: PROCESAMIENTO Y ANALÍSIS EN UN SIG

ELABORÓ: ROSA LAURA CARRILLO GARCÍA

FECHA: OCTUBRE 2011

ENSEÑAR LA EXPLOTACION DE LA TIERRA, NO LA DEL HOMBRE

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES