



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN GEOGRAFÍA

**INCENDIOS FORESTALES EN MÉXICO DESDE UNA
PERSPECTIVA DE RIESGO CLIMÁTICO**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:
LUIS MANUEL GALVÁN ORTIZ

DIRECTOR DE TESIS
DR. VÍCTOR ORLANDO MAGAÑA RUEDA
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA UNAM

Ciudad de México, abril 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatoria

A mi hijo Kenai

A mi esposa Adriana

A mi madre Josefina

A mis hermanos Roxana y Carlos

A mi familia

A mis amigos

A quien me inició en este camino Miguel Cortez

Agradecimientos

Al Dr. Víctor Magaña por compartirme su amplia experiencia, gran paciencia y apoyo en lo académico, también por su confianza y amistad durante estos años.

A los sinodales, especialmente a la Dra. Leticia Gómez y al Dr. Ernesto Caetano por el interés y aportaciones durante todo el desarrollo del presente trabajo. Al Dr. Carlos Díaz y Dra. Lizette Ramos por el tiempo dedicado en la revisión de esta tesis y por sus valiosos comentarios para mejorarla.

Al Dr. Antonio Avalos por compartirme su conocimiento como parte del sínodo, apoyarme para culminar esta investigación y por invitarme a formar parte de su equipo de trabajo en el VARICLIM de la UASLP.

A todos los compañeros del Grupo de Clima y Sociedad del Instituto de Geografía, especialmente a Emmanuel Zúñiga, Moisés Gamaliel, Eduardo Herrera, Violeta Piña y Gustavo Vázquez por su apoyo y amistad.

Al CONACYT por proporcionarme la beca. Al Instituto de Geografía de la UNAM por facilitar las instalaciones durante el desarrollo de esta tesis. Al Dr. Luiz Aragão del INPE por recibirme en mi estancia doctoral en Brasil.

Índice

Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Los incendios forestales como desastre.....	1
1.2. Causas de los incendios forestales.....	4
1.3. Incendios forestales en México.....	8
1.4. Relaciones clima-incendios forestales.....	10
1.5. Objetivo	13
1.6. Una aproximación tradicional al problema.....	14
1.7. Los incendios forestales con un enfoque de riesgo climático.....	16
Capítulo 2. Método y datos	23
2.1. Primeras consideraciones.....	23
2.2. Cuantificación de la amenaza climática.....	26
2.2.1. Caracterización de la sequía meteorológica.....	27
2.2.2. Caracterización de la temperatura.....	30
2.2.3. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.....	31
2.2.4 Información meteorológica adicional.....	33
2.3. Cuantificación de la vulnerabilidad.....	35
2.3.1. Uso de suelo y vegetación.....	36
2.3.2. Áreas Naturales Protegidas.....	38
2.3.3. Índice de Influencia Humana.....	40
2.4. Consideraciones para la integración de datos.....	41
2.5. Hacia una estimación del riesgo.....	43
2.6. Integración de la vulnerabilidad y amenaza climática.....	46
2.7. Una aproximación cuantitativa del riesgo de incendios.....	47
2.8. Evaluación del desastre.....	48
2.9. Capacidad de pronosticar el riesgo de incendios forestales por amenaza climática.....	50

Capítulo 3. Resultados	53
3.1. Riesgo de incendios forestales: comportamiento temporal-regional.....	53
3.2. Caso de estudio: incendios durante la sequía de 2011.....	56
3.2.1 Modelo de riesgo de incendios forestales.....	59
3.3. Evaluación del modelo de riesgo.....	66
3.4. Predicción del riesgo de incendios forestales.....	67
Capítulo 4. Discusión y conclusiones	72
4.1. La gestión del riesgo.....	72
4.2. Trabajo a futuro.....	77
Anexo. Artículo publicado	83
Referencias	95

Capítulo 1

Introducción

1.1. Los incendios forestales como desastre

Los bosques y selvas son de gran importancia para la diversidad biológica de ecosistemas y para la vida de los humanos. Las grandes regiones del planeta con vegetación funcionan como un elemento fundamental en el balance de energía del planeta y tienen la capacidad para capturar el dióxido de carbono (CO₂), un Gas de Efecto Invernadero (GEI) generado por diferentes actividades humanas como los procesos industriales, el uso indiscriminado de combustibles fósiles (petróleo, gas y sus derivados como la gasolina), la pérdida y quema de bosques y selvas, entre otros.

Los bosques proporcionan importantes servicios ecosistémicos, como la regulación del clima y el ciclo hidrológico, incluyendo la recarga de acuíferos, la producción de alimentos y de diversos productos, la captura de gases de efecto invernadero y la calidad del aire que respiramos, así como energía y materiales para la vivienda, la preservación de suelos, o la reducción del impacto de fenómenos meteorológicos extremos (ej., Krieger, 2001), si estos servicios se pierden como sucede cuando se presenta un incendio forestal, se puede considerar como un desastre ambiental. Para que estos servicios continúen manteniendo la calidad de vida, es esencial que los ecosistemas se conserven o se recuperen, en particular en las áreas afectadas por actividades humanas (FAO, 2014).

Los servicios ambientales son el conjunto de condiciones y procesos naturales de los ecosistemas que la sociedad puede utilizar. La biodiversidad, el

germoplasma, los valores estéticos y filosóficos, la regulación climática, la modulación de ciclos básicos del agua, carbono y otros nutrientes y la conservación de suelos son algunos ejemplos de servicios que recibimos del ambiente (figura 1). Son diversas las causas por las cuales la producción de servicios ambientales se reduce día con día en el mundo. En particular, en el sector forestal, las prácticas no sustentables de explotación y de cambios de uso de suelo generan grandes pérdidas de dichos servicios. En algunos sectores, se considera que el no poder cuantificar económicamente el valor de tales servicios hace que no se les de la importancia que merecen. Ello provoca que haya una sobre utilización de los bienes y servicios derivados de las áreas naturales, dando por resultado un eventual agotamiento de estas áreas y la consecuente reducción en la producción de servicios ambientales.

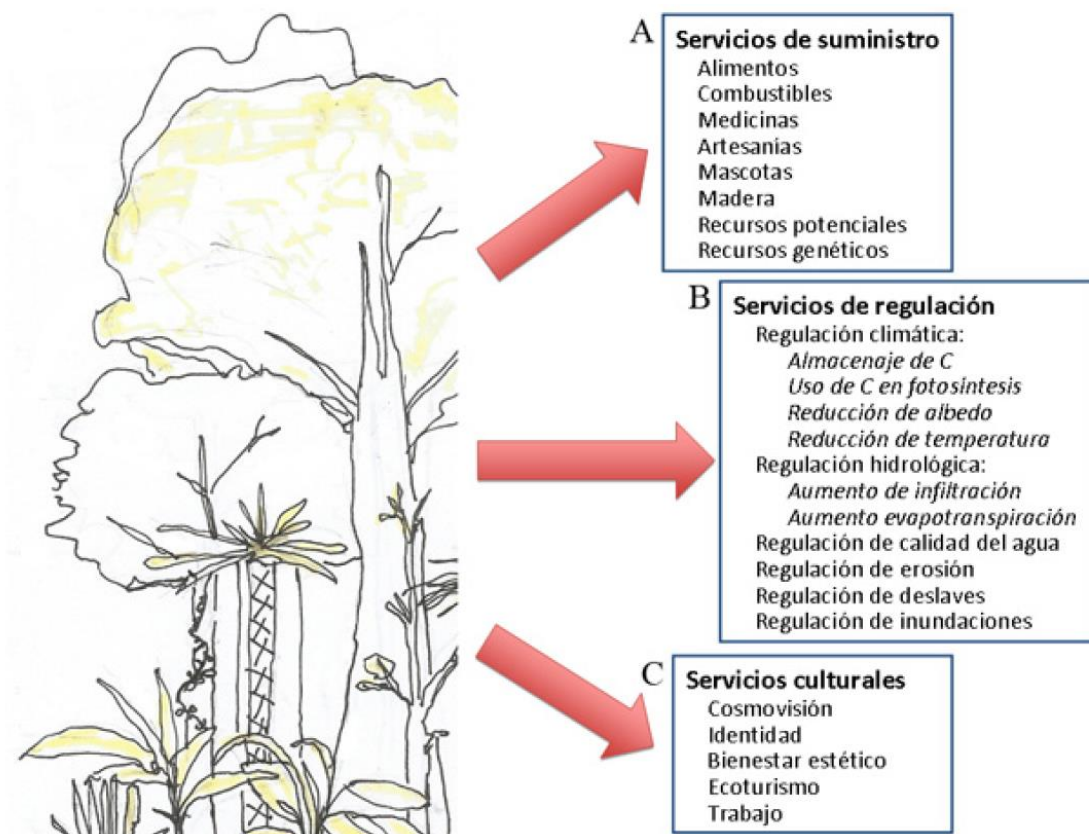


Figura 1. Los servicios ambientales que ofrecen los bosques, (A) de suministro, (B) de regulación y (C) culturales. Fuente: Balvanera, 2012.

El fuego es el principal elemento que afecta a los ecosistemas forestales (Lenihan et al., 1998, Schmoldt et al., 1999). Los incendios son una forma de perturbación sobre bosques, selvas, matorrales y pastizales que se presentan en México, principalmente en la temporada de estiaje, y son la causa por la que muchas áreas de bosques y selvas se han perdido en México. Se les considera un desastre de origen antrópico que tiene impactos negativos a corto y largo plazo, ya que la recuperación del bosque y los servicios ecosistémicos tarda varios años en volver a la normalidad. Se estima que cada año, aproximadamente 350 millones de hectáreas de áreas naturales sufren daños por incendios en todo el mundo (FAO, 2007). Las emisiones de CO₂ resultantes, son casi el 50% de las producidas por la quema de combustibles fósiles (Jolly, et al., 2015), lo cual es paradójico, dado que los bosques deberían capturar y almacenar gases de efecto invernadero, en lugar de emitirlos (Aragão, et al., 2008).

Los incendios forestales naturales, con recurrencia de varios años, pueden tener efectos positivos en los ecosistemas (Ressl y Cruz, 2012), ya que una combustión adecuada y esporádica ayuda a la reducción del material combustible y mantiene el ciclo de nutrientes, como es el caso de los bosques de pino (ej., Rodríguez y Fulé, 2003). En el norte de México, la frecuencia de incendios forestales de origen naturales (ej., los que ocurren por descargas eléctricas) se presenta con patrones de recurrencia de entre 5 a 50 años (McKenzie, 2004). Sin embargo, los periodos de sequía y el incremento de las actividades humanas han aumentado la probabilidad de que ocurran incendios con mayor frecuencia y de mayores impactos. Ejemplo de ello son los que se produjeron en el año de 1998 durante la sequía ocurrida en relación con un evento de El Niño de gran intensidad (Magaña et al., 1999). También se puede mencionar el año 2011, cuando, por una sequía prolongada y severa en la mayor parte del territorio mexicano ayudó a que se presentaran incendios de grandes dimensiones, especialmente en el noreste (ej., James, et al., 2016). Durante un verano de El Niño, las lluvias pueden ser menores a lo normal en la parte central y sur del país y, a veces, esto puede convertirse en una sequía meteorológica. En 1997, el déficit de lluvia asociado a El Niño causó estrés hídrico en la

vegetación que contribuyó a un número récord de incendios en los bosques tropicales de México durante la primavera de 1998 (CONAFOR, 2009).

La sequía del 2011 produjo en el norte de México que las temperaturas máximas superaran los 40°C durante semanas en los meses de primavera. En esta época del año la actividad de los rayos es grande en el estado de Coahuila, lo que dio como resultado una gran cantidad de incendios forestales en este estado (poco más de 424,500 ha de superficie dañada) que devastaron grandes áreas de bosques de coníferas (Magaña y Neri 2012; Zúñiga et al., 2017b; CONAFOR 1970-2015). A pesar de ello, las Áreas Naturales Protegidas (ANP) sufrieron pocos impactos por incendios, lo que muestra que una gestión preventiva de incendios forestales puede disminuir la magnitud del desastre.

1.2. Causas de los incendios forestales

En la mayor parte del mundo, los incendios forestales son principalmente el resultado de actividades humanas relacionadas con el manejo del fuego para producir cambios de uso de suelo o para actividades agrícolas (Nobre y De Simone, 2009; Costafreda, et al., 2017). Los incendios tienen diversas consecuencias en los ecosistemas forestales como son (Nagarajan, 2003):

- Pérdida de producción maderera
- Enfermedades en árboles
- Plagas de insectos
- Deterioro en la productividad de bosques

De acuerdo con CONAFOR (2010), en México los incendios de origen natural solo representan el 1% del total anual, resultado de afectaciones por descargas eléctricas en la atmósfera y esporádicamente, por erupciones volcánicas. El 99% restante de los incendios tiene su origen en alguna actividad humana (Tabla 1). En promedio más de la mitad de los incendios en los últimos años son producto de las actividades agropecuarias, urbanización, incendios intencionados, colillas de cigarro y fogatas (CONAFOR, 2010). Las estadísticas oficiales de México indican que, en su mayoría, los incendios forestales son causados por la práctica de actividades agropecuarias en terrenos forestales; tal es el caso de la agricultura de temporal que aplica prácticas de roza, tumba y quema. Incendiar los pastos para el brote de renuevos y pastoreo en época de sequía está también relacionado con el uso del fuego agropecuario (Galindo et al., 2009).

Accidentales	Ruptura de líneas eléctricas, accidentes automovilísticos, ferroviarios y aéreos.
Negligencias	Quemas agropecuarias no controladas, fogatas de excursionistas, fumadores, quema de basura, limpieza de vías en carreteras y uso de fuego en otras actividades productivas dentro de áreas forestales.
Intencionales	Quemas por conflictos entre personas o comunidades, tala ilegal o litigios.
Naturales	Caída de rayos o erupciones volcánicas.

Tabla 1. Principales causas de los incendios en México. Fuente: CONAFOR, 2010.

Con relación a los incendios de origen natural, los volcánicos se pueden presentar solo cuando algún volcán está en actividad y su alcance de afectación solo se limita a las periferias de este. Por otro lado, el patrón de distribución de los relámpagos en México durante los meses de secas en la mayor parte del país puede indicar que, a pesar de que esta causa es de baja probabilidad, se debe considerar como peligro meteorológico que induce riesgo de incendios en ciertas partes del país, en los meses de marzo a junio (figura 2).

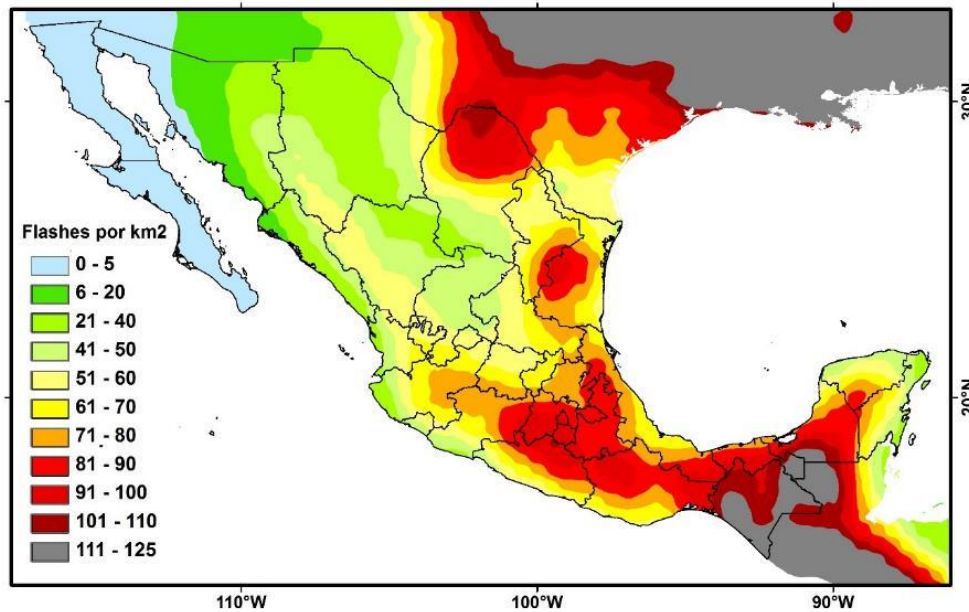


Figura 2. Climatología de relámpagos totales durante los meses marzo-junio en México (1998-2010). Fuente: elaboración propia con base en los datos de Cecil (2014).

A pesar de que algunos procesos naturales pueden constituir el elemento de disparo de un incendio forestal, en el caso de México es la actividad humana la que mayormente produce este tipo de desastres. Por el uso de fuego en la agricultura, es fundamental su distribución para comprender en gran medida donde se produce la mayor parte de los incendios forestales.

Por densidad de población (principal origen de incendios) y una mayor cantidad de bosques, se puede considerar que el centro-sur del país es donde el riesgo de este tipo de desastre es mayor. En particular, la agricultura con manejo de fuego se concentra en el centro sur de México (figura 3), lo que genera un contexto de vulnerabilidad durante episodios de sequía. Sin embargo, se deben considerar otros factores antrópicos que en conjunto generan las condiciones espaciotemporales propicias para que los incendios se presenten año con año durante la temporada de secas.

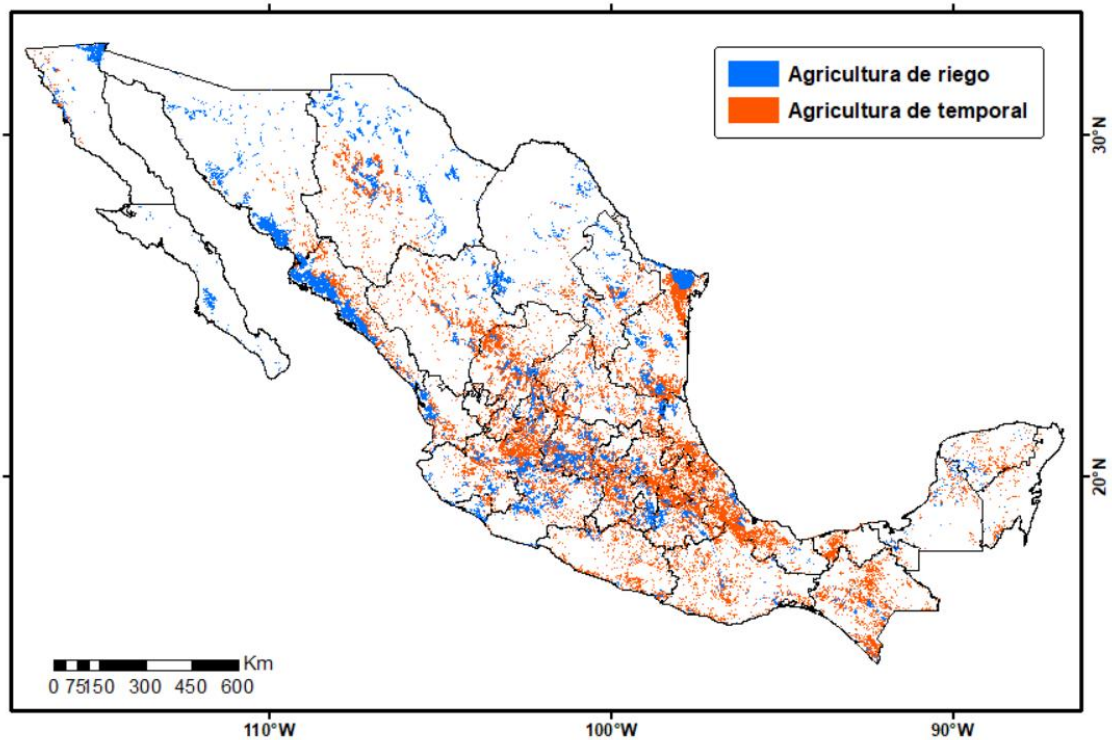


Figura 3. Distribución de la agricultura en México. Fuente: elaboración propia con datos de INEGI, 2021.

A pesar de diversas acciones de política ambiental encaminadas al control y eliminación de los incendios forestales en México, siguen siendo un gran problema, principalmente por la falta de capacidad para la prevención. De acuerdo con la FAO (2020) México ocupa uno de los primeros lugares en tasas de deforestación en el mundo, sin embargo, no ha aumentado en las últimas décadas de manera considerable. La degradación de ecosistemas, como la relacionada con la deforestación, genera altos niveles de pobreza rural, en un círculo vicioso que lleva a mayor explotación inadecuada de los recursos y mayores niveles de pobreza. La pobreza es causal de deforestación porque i) el pobre valora más el recurso presente que promesas de futuro, ii) el pobre tiene poca información y lenta adaptación al cambio tecnológico, iii) el pobre tiene una limitada gama de actividades productivas y iv) la pobreza esta regularmente asociada a una alta presión demográfica que exige una mayor presión sobre el recurso (FAO, 2020).

1.3. Incendios forestales en México

Los incendios forestales en México son más frecuentes durante la primavera y principios del verano (marzo-junio), lo que coincide con el ciclo climático anual en su fase de baja precipitación y altas temperaturas. La cantidad de incendios forestales es mayor entre abril y mayo (figura 4), cuando las temperaturas en la mayor parte de México alcanzan un máximo y el estrés hídrico de la vegetación aumenta.

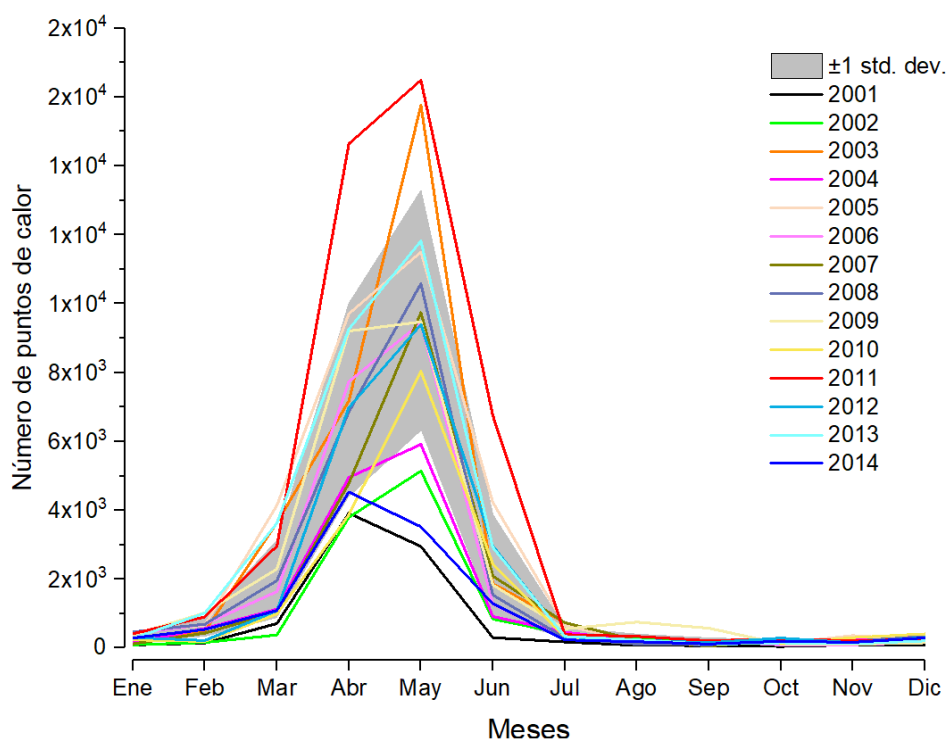


Figura 4. Puntos de calor (incendios forestales) por mes en México durante los años 2001 a 2014. Banda gris: ± 1 desviación estándar en el número de eventos detectados. Fuente: elaboración propia con datos de FIRMS-NASA.

Después del inicio de la temporada de lluvias, entre junio y julio, el número de incendios forestales en México se reduce significativamente. Por ello, los esfuerzos para reducir el número de incendios forestales se centran en disminuir el uso del fuego en actividades agrícolas durante la primera mitad del año, en los periodos de preparación de la tierra para los cultivos. La estacionalidad de los

incendios forestales en relación con el inicio del ciclo agrícola de primavera-verano, ha llevado a proponer esquemas de roza, tumba y pica (ej., Programa de Incendios Forestales del Estado de Tlaxcala, 2013), en lugar de la tradicional roza, tumba y quema. Los resultados aún son cuestionables, pues siguen existiendo otras prácticas del uso del suelo.

En México, diversas acciones han mejorado la capacidad de controlar incendios forestales (ej., aumento número de brigadistas, contratación de aeronaves para apagarlos, creación de líneas cortafuego, etc.), pero siguen faltando políticas efectivas para prevenirlos. Al igual que en otras situaciones de riesgo climático, la respuesta y recuperación después del desastre es más frecuente que la prevención. Estimaciones simples parecen indicar que el número de incendios forestales en México durante los últimos 45 años ha aumentado más rápido que el área afectada. Exceptuando el año 2011, de una sequía excepcional en el norte de México, hay una reducción del área afectada por incendios entre 1998 y 2010 (figura 5). Durante el mismo periodo, el número de incendios forestales aumentó. Esto indica un avance en las capacidades para apagar incendios, no así para prevenirlos, siguiendo el esquema de mejora para responder a la emergencia y el desastre, más que para disminuirlo o eliminarlo.

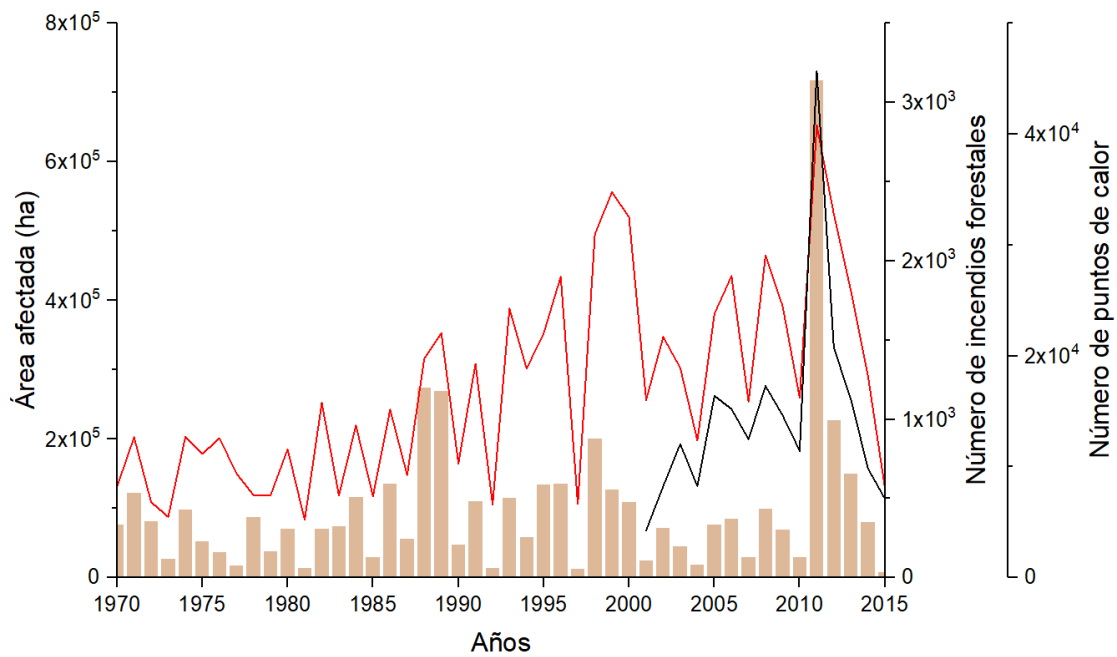


Figura 5. Número anual de incendios forestales en el norte de México (línea roja), se incluye el área afectada (barras marrones) (con datos de CONAFOR, compilación propia de las estadísticas 1970-2015), y puntos de calor asociados con la cantidad de incendios (línea negra) (NASA-FIRMS, compilación propia de 2001-2015).

En 2011, los incendios forestales de Coahuila afectaron a una gran área, lo que muestra la debilidad de las políticas de prevención de incendios forestales en la mayor parte del país. Es necesario identificar y reducir, los factores que repercuten en vulnerabilidad ante la sequía y que resulta en riesgo de incendios forestales a niveles críticos. La mayor parte de los estudios sobre incendios forestales en México abordan las características espaciotemporales del desastre, pero en pocas ocasiones se analiza el problema con enfoque de riesgo climático.

1.4. Relaciones clima-incendios forestales

A través del análisis de la historia del fuego, se han obtenido relaciones entre los patrones espaciotemporales de los incendios forestales y la variabilidad climática

(McKenzie, 2004). Sin embargo, sigue siendo necesario considerar las interacciones entre clima y ecosistema por diferentes regiones, integrado las características del paisaje, para así identificar, por un lado, las formas de variabilidad climática regional y la tolerancia de la vegetación a la sequía, pero por otro, las actividades humanas que inducen vulnerabilidad (Galván, 2011). En otras palabras, se requiere un entendimiento de procesos, lo que implica un análisis integral de factores climáticos, ecológicos, sociales y económicos. El campo de la Geografía resulta un espacio ideal para tal análisis, al combinar diversos saberes en relación con estos temas.

En el caso de México, los principales problemas relacionados a la variabilidad climática tienen que ver con exceso o déficit atípico de lluvia (sequía meteorológica) por los consecuentes efectos en la disponibilidad de agua, ya que las condiciones de sequía prolongada han tenido enormes costos sociales, ambientales y económicos (García, 2006). Debido a la sequía, el sector forestal ha tenido impactos negativos mayúsculos, pues vegetación con estrés hídrico amplifica los incendios forestales, los cuales tienen un origen antrópico. Las sequías meteorológicas intensas impulsan una mayor probabilidad de incendios forestales de gran magnitud, por lo que en ocasiones se puede identificar una relación casi directa entre la cantidad de incendios y el clima. Sin embargo, en algunas regiones las actividades humanas que provocan los incendios producen daños recurrentes aun sin grandes anomalías climáticas.

Las sequías meteorológicas propician estrés hídrico en la vegetación. En 1998, el déficit de lluvia asociado con El Niño causó una condición de sequía severa especialmente en el centro-sur de México, que contribuyó a un número récord de incendios en los bosques tropicales (CONAFOR, 2009). Entre 2010 y 2013 hubo una sequía prolongada en el centro-norte de México, cuya intensidad máxima se alcanzó en la primavera de 2011 (figura 6). En este año, las temperaturas en algunas partes del noreste de México superaron los 40°C durante varios días, lo que llevó a un alto nivel de riesgo de incendios forestales en el país, especialmente en el estado de Coahuila donde se registró un número

récord de incendios que devastaron grandes áreas forestales (Magaña y Neri, 2012).

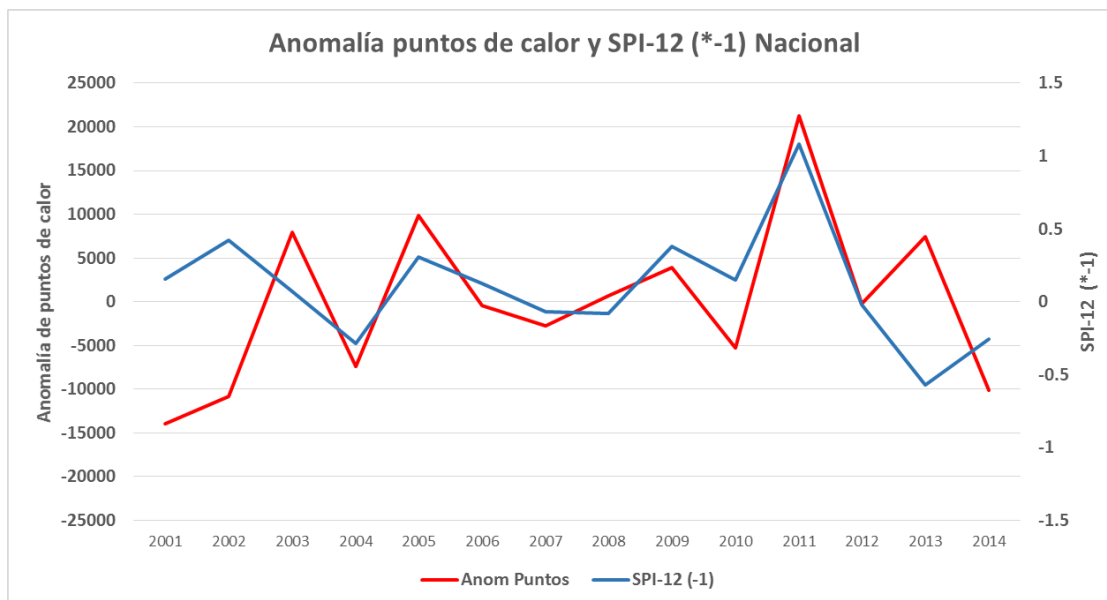


Figura 6. Relación entre la sequía meteorológica (SPI) y los puntos de calor anuales (anomalía) durante el periodo 2001-2014. Fuente: elaboración propia con datos de NASA-FIRMS y SPI-PRECL0p5 (Chen et al., 2002).

Los altos costos económicos y ambientales que los desastres de origen climático tienen en México, requieren de una respuesta científica que permita hacer de la información climática una herramienta común entre actores clave, ya sean privados o de gobierno. La prevención siempre dependerá del nivel de riesgo que se estima. Por lo anterior, es esencial conocer las relaciones entre el clima y las características de los regímenes del fuego: la frecuencia, la severidad y los efectos sobre los ecosistemas. El reto de una adaptación a la variabilidad y el cambio climático obliga a construir una estrategia encaminada al uso adecuado de la información del tiempo y el clima, como parte de las acciones de adaptación. De cara a la conservación y al manejo de los ecosistemas, con el uso del fuego se tiene un gran desafío debido a sus potenciales impactos (Agee, 1998, Lertzman et al., 1998) y a la serie de elementos sociales, ambientales y económicos que están involucrados en su distribución espaciotemporal.

Si se consideran eventos climáticos de sequía extrema como un factor que favorece la presencia de incendios forestales, las actividades humanas (ej., agricultura), así como la capacidad de prevenir desastres, un tomador de decisiones debe abordar el tema de los incendios forestales desde una perspectiva integradora, donde las actividades humanas y los efectos de un clima adverso, expliquen el incremento de los incendios en los últimos años desde una perspectiva de riesgo. Sin embargo, las acciones gubernamentales se plantean desde un enfoque fragmentado, y la respuesta al problema se da pobremente con acciones reactivas y de mitigación del desastre (como en los años 1998 y 2011). Las preocupaciones inmediatas para satisfacer las demandas sociales permiten la sobreexplotación, la degradación y el mal manejo de los recursos naturales (Folke et al., 2009) sin reconocer que dicha degradación ambiental empobrece aún más a la sociedad.

1.5. Objetivo

El presente trabajo tiene como objetivo general, desarrollar y evaluar una metodología integral que permita cuantificar el riesgo de incendios forestales en función del clima y los factores de vulnerabilidad, de forma tal que sea útil para una gestión preventiva del riesgo.

Específicamente, se tiene interés en:

- i) Analizar los factores que aumentan el riesgo y la magnitud de desastre denominado incendio forestal en tiempo y espacio
- ii) Cuantificar el riesgo para establecer niveles de riesgo crítico que requieran acciones de prevención
- iii) Analizar la utilidad de la información de pronóstico estacional del clima para una mejor gestión del riesgo

iv) Mostrar que la información de riesgo climático puede ayudar a definir sobre que factor de vulnerabilidad actuar, estructural y coyunturalmente

1.6. Una aproximación tradicional al problema

Aunque el discurso oficial hace referencia a la necesidad de prevenir los desastres, la idea que persiste es que los desastres “son naturales” con lo que se mantiene una respuesta al desastre más que un esfuerzo por prevenirlos, sobre todo entre los responsables de sectores o de gobierno (Maskrey, 1993). Tradicionalmente se relaciona los incendios forestales con altas temperaturas y condiciones de sequía de forma directa (ej., CONAGUA, 2022; INPE, 2022). Sin embargo, estas condiciones atmosféricas solo son precursores para que la vegetación presente sequedad, pero en la mayor parte de los incendios forestales en México, no son la causa de los incendios. Aunque se reconoce que la causa de estos desastres está principalmente en la actividad humana, se mantienen prácticas tradicionales de manejo del fuego sin establecer medidas precautorias que mitiguen el uso de este elemento cerca o dentro de los bosques, especialmente en condiciones de sequía meteorológica. Por esta razón, las aproximaciones a este problema seguidas hasta ahora resultan insuficientes, pues no se considera una interacción entre ecosistema-atmósfera-sociedad como un sistema.

A nivel mundial se han desarrollado modelos de riesgo de incendios con aplicación a escala global o nacional. Sin embargo, el acceso a tales modelos resulta insuficiente si no se considera la problemática desde una perspectiva integral sociedad-medio ambiente. El recurrente manejo de una visión naturalista del problema, en donde se recurre a las condiciones atmosféricas de forma directa como sinónimo de riesgo de fuego, sin considerar las condiciones de los ecosistemas y las actividades humanas como primera causa de incendios, mantiene una actitud pasiva frente a las causas verdaderas del problema en

México. Algunas instituciones internacionales integran modelos de pronóstico meteorológico global para generar índices de potencial de incendios considerando variables como precipitación, humedad, temperatura, índices vegetales, etc. Pero estas aproximaciones no toman en cuenta el factor humano, por lo que los resultados indican de forma muy general los lugares con potencial de incendio (ej., UNISDR, 2017; INPE, 2022). Las características locales de actividades humanas, la existencia de áreas de protección del medio ambiente, la cercanía de vías de comunicación a bosques y selvas, la presencia de vacacionistas en los bosques durante la época más seca y cálida del año, y otras características del espacio geográfico son factores importantes para la ocurrencia de incendios. Su caracterización debería ser útil para la toma de decisiones.

Algunos estudios sugieren considerar también el uso de suelo y el tipo de vegetación para identificar lugares con potencial de incendios forestales (ej., USDA, 2014). Sin embargo, al no integrar condiciones atmosféricas que varían en el tiempo, dicha aproximación solo resulta en un modelo estático, útil para identificar donde se presentaron incendios en el pasado reciente, pero menos útil para plantear dónde se podrían presentar condiciones de sequía que favorezcan su número y extensión.

Como se mencionó anteriormente, en México, el 99% de los incendios forestales están relacionados con diversas actividades humanas. Los incendios intencionales cerca de áreas forestales o los litigios relacionados con la tenencia de la tierra también son factor que lleva a algunos a provocar incendios forestales (CONAFOR, 2001). En consecuencia, no son solo las sequías meteorológicas y altas temperaturas las causas de incendios forestales, sino que diversas conductas humanas originan su ocurrencia sin que se haga lo suficiente para cambiar dichas conductas.

El estudio y manejo de los ecosistemas se ha trabajado tradicionalmente de manera monodisciplinaria y fragmentada (Ortega et al., 2014), lo que dificulta la visión integradora del riesgo. Esto conlleva al uso del paradigma naturalista, en el que se explican los incendios forestales por la ocurrencia de una condición atmosférica natural considerada adversa. Dicho enfoque ha tenido como consecuencia la nula acción preventiva teniéndose que asumir los costos sociales, económicos y ambientales del desastre de manera recurrente. Incluso se relaciona a los incendios forestales con el cambio climático sin un verdadero ejercicio de atribución, suponiendo que el incremento en las temperaturas y la presencia de sequías indujeran directamente los incendios.

A diferencia de estudios previos que describen las características de los incendios forestales solo con relación a la sequía meteorológica (ej., Ávila et al., 2010; Rodríguez y Fulé, 2003), y otros que plantean aproximaciones desde una perspectiva social descriptiva, sin una cuantificación objetiva o bajo estadísticas de la percepción poblacional (ej., Carreón et al., 2006), el presente estudio propone una aproximación del problema bajo una perspectiva de riesgo, la cual considera de manera integral, el peligro (ej. sequía meteorológica), la exposición de los ecosistemas y las condiciones socioambientales que generan un contexto de vulnerabilidad, dando como resultado en conjunto, un modelo de riesgo de incendios forestales en el territorio nacional.

1.7. Los incendios forestales con un enfoque de riesgo climático

Todos los años se reportan numerosos incendios forestales en México que agravan la crisis ambiental del país., Las acciones preventivas han sido insuficientes (Zúñiga et al., 2017a) por lo que el problema continúa. Aunque ha habido avances en la capacidad para detectar y controlar la propagación de los incendios forestales inducidos por diversas actividades humanas, todavía queda mucho trabajo por hacer para prevenirlos. Para ello se requiere un adecuado

análisis de la información climática y su uso en la gestión del riesgo, considerando la vulnerabilidad regional para definir las acciones preventivas, particularmente durante años secos y calurosos (Anderson et al., 2019).

El análisis de riesgo es el elemento clave para entender cómo se construyen los desastres de forma que se entiendan los procesos sobre los cuales se debe incidir para evitar que el riesgo se materialice en desastre o mitigar sus efectos (Gellert, 2012). La construcción de un evento en que se presentaron incendios forestales de grandes dimensiones resulta en un ejemplo de las interacciones entre el medio natural y las actividades humanas, cuando se combinan condiciones de sequía meteorológica, y acciones inadecuadas de manejo del fuego. Pero es quizá lo complejo del análisis de riesgo (multifactorial y dinámico) lo que ha limitado su entendimiento y por ello, el que se avance en acciones preventivas.

Con base en Bar et al. (2012), los incendios forestales son procesos no aleatorios, es decir, dependen de factores físicos y sociales, con patrones espaciotemporales específicos de arriba hacia abajo y de abajo hacia arriba (Krawchuk et al., 2006; Parisien y Moritz, 2009; Moritz et al., 2011; Narayanaraj y Wimberly, 2011). De arriba hacia abajo las condicionantes atmosféricas de gran escala espacial varían en el tiempo (ej., sequía-meses, temperaturas-días), que generan condiciones naturales peligrosas, y en ocasiones encuentran un evento detonador para el incendio (ej., rayos). Los efectos de arriba hacia abajo también modulan la acumulación de material combustible, como la vegetación (con baja humedad), esto interviene en la probabilidad de presentarse incendios forestales (Latham y Williams, 2001). Por otro lado, de abajo hacia arriba, las actividades humanas, están estructuradas en variables a escala local, que cuando están relacionadas con el uso de fuego en diversas acciones humanas (ej., quemas agrícolas, fogatas, colillas de cigarro, vías de comunicación, etc.) aumentan la probabilidad de incendios por su proximidad a los ecosistemas forestales (Krawchuk et al., 2006; Sturtevant y Cleland 2007; Syphard et al., 2007 y 2008).

En el presente trabajo se considera al concepto de socioecosistema, como base para un análisis integral del riesgo, el cual se concibe bajo la idea de: heterogeneidad, complejidad e incertidumbre, y hace alusión a las interrelaciones entre las actividades humanas y el medio natural, considerándolos como un todo integrado que interactúa de “arriba hacia abajo y de abajo hacia arriba”, con un enfoque transdisciplinario que plantea una composición de diferentes áreas del conocimiento y sus metodologías, en el contexto sugerido por Ortega et al. (2014). En otras palabras, los socioecosistemas se entienden como sistemas complejos y adaptativos en los que distintos aspectos ecológicos y culturales están interactuando entre sí (Resilience Alliance, 2010). Este enfoque teórico resulta ideal para abordar los estudios de riesgo climático en ecosistemas, en particular, el riesgo de incendios forestales.

En la actualidad, la presencia humana en la mayor parte de los ecosistemas de México y del mundo, genera conflictos socioambientales que derivan frecuentemente en desastres, y es bajo estas condiciones que se vuelve necesario impulsar un cambio de paradigma en el manejo y protección de bosques, selvas y pastizales, entre otros, siguiendo el concepto de socioecosistemas propuesto por Spangenberg (2011). Bajo esta perspectiva se plantea una construcción del concepto riesgo, que no se estructura solo desde la sociedad, sino de una interacción sociedad-naturaleza, mediante relaciones que pueden ser representadas en componentes físicos, bióticos y humanos. Un análisis de riesgo bajo la conceptualización de socioecosistema, lleva a la producción de conocimiento útil, que busca mejorar el bienestar de las comunidades y propone una relación equilibrada entre estas y su entorno, que derive en estrategias que permitan el desarrollo integral, por medio de decisiones socialmente justas en cuanto a la conservación, apropiación y distribución de los servicios ecosistémicos que brindan los bosques (Berkes et al., 2003; Ortega et al., 2014).

En el campo de la Geografía Ambiental, bajo una perspectiva de socioecosistemas, resulta ideal la construcción de modelos de riesgo integrado por las condiciones climáticas extremas como parte del entorno natural, que requiere de un entendimiento espaciotemporal expresado en términos de afectación en diversos sectores. Para su aplicación con relación a los incendios forestales, los datos climáticos deben ser transformados en información útil para el sector forestal. Para la construcción de un modelo de riesgo de incendios forestales, se requiere conjuntar una base sólida de la información climática, con un entendimiento de las condiciones y procesos que generan vulnerabilidad a los socioecosistemas, lo cual está en función de la escala de la información obtenida para su análisis, desde escalas regionales como las sequías, hasta su impacto en comunidades vegetales a nivel local.

Existen varias formas de integrar el riesgo por medio de ecuaciones teóricas, pero en el presente estudio se utiliza la propuesta de Sanahuja (1999), la cual parte de “el modelo conceptual prototipo del riesgo”, que define el riesgo como producto de amenaza y vulnerabilidad:

$$\text{Riesgo} = \text{amenaza} \times \text{vulnerabilidad}$$

Esta expresión se usa en la actualidad con fines didácticos principalmente, para hacer comprender que el riesgo de desastre es el resultado de una relación dinámica y dependiente entre estos dos factores. Considerando estos términos, la ecuación puede llevar a un modelo teórico de riesgo en el cual “sin amenaza no existe riesgo; sin vulnerabilidad, la amenaza no puede consumarse en daño” (Sanahuja, 1999: p15). El resultado de riesgo debe entenderse como una probabilidad de ocurrencia, algo que tal vez no pase, pero que en la gestión de riesgo se requiere manejar a pesar de la incertidumbre. Si hay certeza no hay riesgo (Elms, 1992).

En el presente estudio la vulnerabilidad está determinada por las características de los socioecosistemas que modulan la probabilidad de que los incendios forestales se presenten, con cambios relativamente lentos a través de los años (baja frecuencia). Ejemplo de los factores que modifican la vulnerabilidad de un ecosistema son el tipo de vegetación, la densidad de población dentro o cerca de los ecosistemas o el grado de protección que reciben dentro de los programas de las ANP. La vulnerabilidad de un ecosistema también depende de la accesibilidad a los ecosistemas forestales y de la distancia a las actividades humanas (ej., carreteras) o las prácticas dirigidas al cambio de uso de suelo (Pérez et al., 2013). Hoy en día es claro que la vulnerabilidad juega un papel fundamental para el entendimiento del porqué de un desastre, ya que los sistemas y su funcionamiento dependen de múltiples factores que van más allá de solo la magnitud de las condiciones extremas del clima (Magaña, 2013).

El uso de suelo y tipo de vegetación se relaciona directamente con la exposición de los socioecosistemas, siendo los bosques y selvas cercanos a zonas agrícolas los que pudieran ser más vulnerables, a diferencia de los que se encuentran bajo algún grado de protección, con poco acceso carretero y lejanos a actividades agropecuarias. La integración y representación de dichas características para cuantificar la vulnerabilidad no es tarea simple. Es común que la cuantificación de las amenazas se haga de forma tradicional, por medio de las unidades con que miden ciertos fenómenos naturales (ej., onda de calor en °C), sin embargo, para medir la vulnerabilidad es necesario diseñar estrategias que en ocasiones resultan complejas para convertir lo cualitativo en algo cuantitativo. En el presente estudio se propone una aproximación numérica de la vulnerabilidad con base en las características de los socioecosistemas que están relacionadas al fuego, que al ser integradas resulta una herramienta útil para el análisis de riesgo de incendios forestales.

La amenaza está representada principalmente por características climáticas y sus efectos, que fluctúan en tiempo de días a semanas (alta frecuencia), y que resultan en aumentar la probabilidad de incendios forestales (ej., sequía, altas

temperaturas). Dichas condiciones atmosféricas, a diferencia de las variables cualitativas, son comúnmente representadas en forma numérica por medio de unidades o índices. El reto está en torno de la integración de dichas variables estandarizando sus diferentes temporalidades, resoluciones y unidades de medición.

Incluir todos los aspectos de la vulnerabilidad y la amenaza para determinar la ocurrencia de los incendios forestales resulta casi imposible, por lo que se propone utilizar las variables que teóricamente se han relacionado con la presencia de estos, proponiendo un modelo de riesgo, donde el resultado aporte a la explicación de la distribución de incendios en tiempo y espacio, especialmente bajo condiciones de sequía. Lo que no se explica con el modelo de riesgo, es posible que se relacione con características locales. Esto se tiene que considerar como incertidumbre dentro del análisis de riesgo a escala nacional, y abre la posibilidad de recalibrar el modelo a escala regional en trabajo futuro.

Un modelo de riesgo (ej. Neri y Magaña, 2016) busca explicar las causas de los desastres, los cuales pueden considerarse como la “materialización del riesgo”, lo que significa que, en ocasiones, este alcanza niveles por encima de un valor crítico, que incrementa la probabilidad de incendios forestales a niveles intolerables. Se propone un modelo teórico donde se analiza la amenaza climática como la manifestación del peligro, el cual se combina con características y actividades en el socioecosistema, para así entender el origen de los incendios forestales (figura 7), quedando como referencia para la gestión del riesgo.

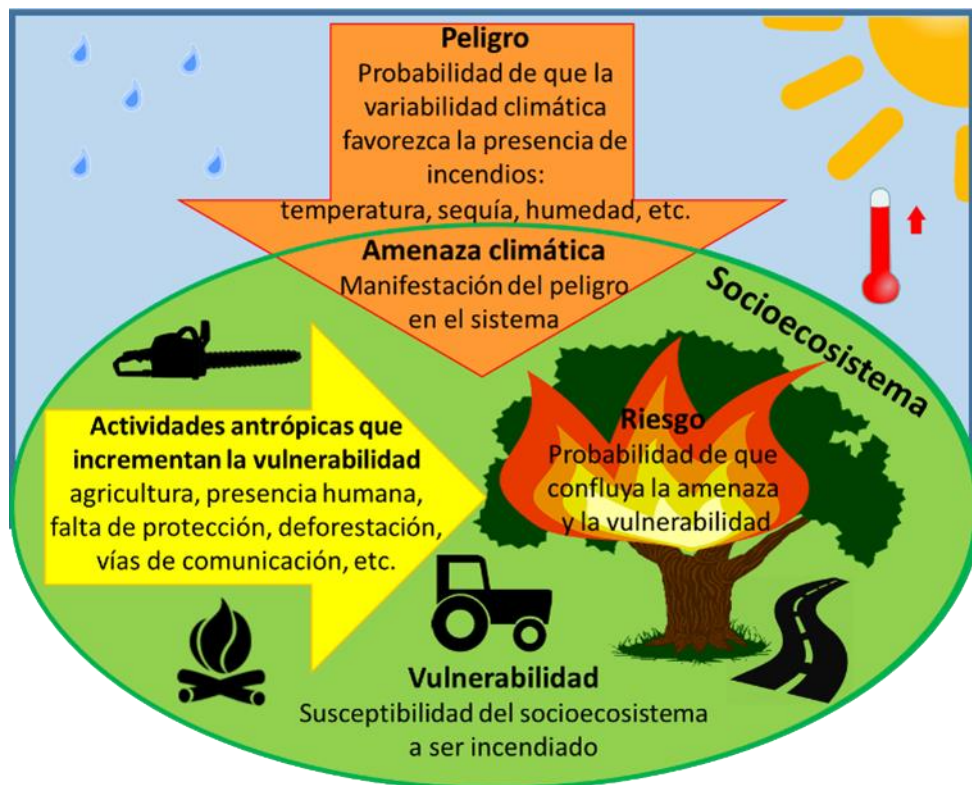


Figura 7. Diagrama teórico del riesgo de incendios por amenaza climática.

El trabajo está estructurado de la siguiente manera: El Capítulo 1, presentó una visión introductoria del problema de riesgo de incendios forestales y una propuesta teórica de cómo abordarlo; el Capítulo 2 describe los datos y la propuesta metodológica seguida para el diagnóstico de riesgo; en el capítulo 3 se evalúan el resultado de combinar la información del peligro climático y la vulnerabilidad, para explicar la tendencia creciente en el número de incendios forestales y se propone un modelo de riesgo con formas de evaluación, incluyendo un estudio de caso para el evento de sequía meteorológica de 2011 en México. Finalmente, en el capítulo 4, se discute la viabilidad del modelo de riesgo con fines de aplicación y se dan recomendaciones para las políticas de gestión en el sector forestal incluyendo las conclusiones del estudio.

Capítulo 2

Método y datos

2.1. Primeras consideraciones

Para analizar el riesgo es importante cuantificar, lo que implica caracterizar el peligro (o amenaza) y la vulnerabilidad. A pesar de múltiples aproximaciones al problema de estimar el riesgo, no existe una metodología universalmente aceptada para diagnosticar y cuantificarlo, especialmente con relación a incendios forestales. Por ello, es necesario generar propuestas metodológicas dirigidas a su cuantificación. Algunos trabajos en cuanto al uso de indicadores para poder analizar el peligro, la vulnerabilidad y el riesgo, han permitido construir una metodología que aborda la actividad y magnitud de los desastres relacionados al clima como el de Neri y Magaña (2016).

Una forma en la que se estima el riesgo es usando como referencia los desastres ocurridos, a partir de lo cual se aprende sobre su origen y lo que lleva a proponer acciones de reducción de vulnerabilidad. Dicha aproximación se conoce como *ex-post*, es decir, se estima el riesgo a partir de los desastres pasados. La evaluación *ex-post* es precisa para cuantificar lo ocurrido, pero no permite hacer proyecciones de cómo se construye riesgo y, por lo tanto, es limitada para hacer prospectiva y planeación. Por otro lado, existen las aproximaciones *ex-ante*, en las cuales los resultados de una acción concreta, o una serie de acciones de gestión de riesgo o de una condición de amenaza, se prevén y por tanto se anticipa cuál será el riesgo de desastre. Dicha aproximación resulta útil para hacer prevención y planeación a través de la construcción de escenarios.

En el presente estudio se propone una metodología para el diagnóstico (*ex-post*) y cuantificación del riesgo de incendios forestales en México ocurridos en años recientes, con la finalidad de llegar a una forma de estimar condiciones de riesgo futuro (*ex-ante*), usando pronósticos climáticos a mediano plazo (siguientes meses), que permitan promover estrategias de gestión preventiva mediante la generación de escenarios de riesgo de incendios.

Para la cuantificación del riesgo es necesaria la integración de información sobre el medio físico y humano, que resulte en una valoración del peligro y vulnerabilidad, que lleva a desastres como los incendios forestales, cuando el peligro se materializa en amenaza, por ejemplo, en regiones donde bajo condiciones de sequía meteorológica y actividades humanas como la agricultura con uso de fuego se combinan para generar riesgo (alta probabilidad de incendios), como en los años 1998 y 2011, que se materializaron en dos de las temporadas de incendios forestales más devastadoras en México.

Son diversos los desafíos para incorporar la información climática en actividades humanas y en el manejo de recursos naturales (Broad et al., 2002; Hartmann et al., 2002). Algunos retos se relacionan con el entorno probabilista de los pronósticos de tiempo y clima, la comprensión dinámica del sistema climático y su descripción en los modelos numéricos. A lo anterior hay que añadir el nivel de conocimiento sobre las interacciones del clima con los ecosistemas o con las actividades socioeconómicas, que no siempre se pueden representar mediante ecuaciones. Pero quizá, el reto más importante es la falta de elementos que permitan desarrollar una cultura de riesgo climático, encaminada a la prevención. En México, aún prevalece el paradigma naturalista que explica los desastres sólo en función del peligro climático y pasa por alto el contexto de vulnerabilidad.

Para reducir el riesgo climático es posible aprovechar la diversificación y disponibilidad de información climática en la actualidad, como las derivadas de percepción remota con la que se logra mayor cobertura en tiempo y espacio

como complemento de las mediciones meteorológicas rutinarias *in situ*, que permiten establecer el nivel de los impactos (ej., puntos de calor asociados con incendios forestales). Los satélites meteorológicos llevan en el espacio más de 40 años, pero en ocasiones el uso de la información que de ellos se obtiene es limitado, a pesar de que el acceso es libre y en tiempo real.

Los sensores remotos proporcionan información socioambiental importante en la estimación de factores de riesgo, como el estrés hídrico de la vegetación calculado con índices vegetales, un ejemplo es el Índice Normalizado de Vegetación (NDVI por sus siglas en inglés, Rouse et al., 1974), que se puede obtener de fuentes como LANDSAT, MODIS o SENTINEL (figura 8).

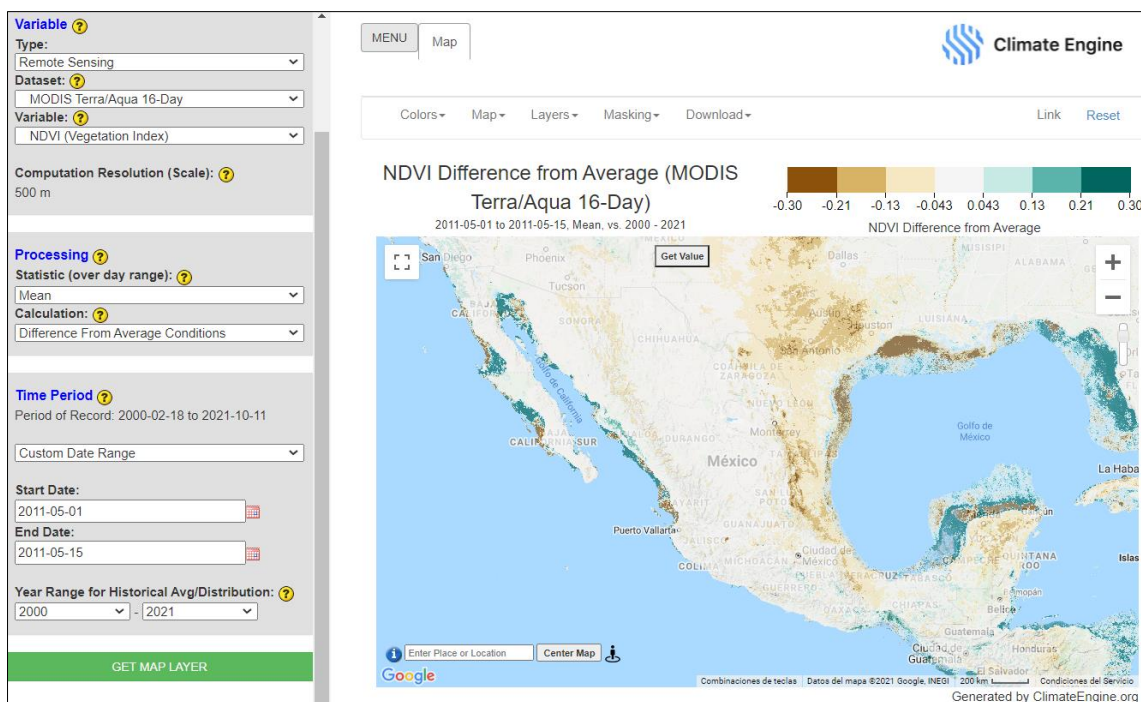


Figura 8. Ejemplo de una anomalía quincenal de NDVI (MODIS) como factor en el riesgo de incendios (1ra quincena de mayo 2011). Fuente: Interfaz de usuario de Climate Engine (Huntington et al., 2017).

2.2. Cuantificación de la amenaza climática

El peligro es la probabilidad de que se presente una condición de tiempo o clima que se considera afecta a un sistema vulnerable y se refleja en efectos negativos (INECC, 2013). Para el caso de los incendios forestales, el peligro será la condición atmosférica que después de un análisis histórico, sugiere que dispara una condición de riesgo que con frecuencia se manifiesta en desastre. Cuando el peligro se hace presente en el socioecosistema y pasa a ser una amenaza, puede rebasar cierto umbral de riesgo y la probabilidad de ocurrir incendios se considera muy alta o intolerable, y es cuando se recomienda actuar. El criterio para definir ese umbral crítico no siempre está dado por una regla específica pues depende, entre otras cosas, del valor de lo que está en juego y el costo de las acciones de prevención.

El factor peligro no se limita a una variable climática. Se puede tratar de una combinación de elementos meteorológicos que se expresan en un índice (probabilidades de peligro). Las condiciones atmosféricas que juegan un papel crucial para la presencia de incendios incluyen temperaturas máximas extremas, falta de humedad en suelo y atmósfera y actividad de descargas eléctricas. Por lo general, la sequía meteorológica implica temperaturas máximas anómalamente altas por la falta de nubosidad, lo que incrementa la evapotranspiración y genera estrés hídrico en la vegetación. Sin embargo, sólo en unos pocos casos, los incendios son inducidos por descargas eléctricas, por ejemplo, en el norte de México. Las condiciones poco favorables en el socioecosistema (estrés hídrico en la vegetación) favorecen que la acción humana resulte en incendios forestales. Para el presente trabajo se decidió caracterizar la amenaza climática (caso de la primavera del 2011) en términos de un índice de sequía meteorológica, anomalías de temperatura máxima y anomalías de NDVI que refleja el estrés hídrico vegetal como *proxy* de la baja humedad en suelo y atmósfera.

Los componentes de la amenaza climática anteriores no sólo son monitoreados de forma sistemática por diversos instrumentos (estaciones meteorológicas, satélites), sino que también son pronosticados, lo que permite realizar escenarios de riesgo climático, para generar alertas tempranas. Contar con esta información permite realizar acciones de gestión bajo el supuesto de que la vulnerabilidad cambia lentamente y se puede considerar constante en un cierto año. Para utilizar la información de procesos sobre incendios, es necesario contar con la ayuda de especialistas en diversos campos del conocimiento, como la percepción remota, los sistemas forestales, la movilidad humana, etc. La interacción entre este tipo de especialistas facilita la toma de decisiones cuando se trata de aprovechar el conocimiento de las relaciones clima-sector, umbrales de riesgo o valores de riesgo crítico, y del valor de la prevención ante amenazas climáticas.

2.2.1. Caracterización de la sequía meteorológica

La principal condición natural que favorece la presencia de incendios en México es la sequía meteorológica. La sequía meteorológica corresponde a una disminución de la precipitación con respecto de un valor esperado en diferentes escalas de tiempo y con diversas duraciones. La sequía se presenta en cualquier región climática, con consecuencias en sectores naturales y socioeconómicos que corresponden a sequías hidrológicas, agrícolas o socioeconómicas. Su cuantificación en términos de temporalidad, distribución, intensidad y efectos depende del sector bajo estudio que es impactado por la falta de lluvia (Galván, 2011).

Junto con la falta de lluvia, la sequía genera condiciones de altas temperaturas, y baja humedad relativa (NDMC, 1991). Estas condiciones aumentan la evapotranspiración y consecuentemente generan estrés hídrico en la vegetación, lo que la hace más proclive a ser afectada por el fuego. Debe

recordarse que en la mayor parte de México los incendios forestales son mayormente resultado del uso inadecuado del fuego, y sólo en algunos casos por los efectos de descargas eléctricas naturales.

La sequía meteorológica en este estudio es representada por la disminución de la precipitación acumulada en tres meses, caracterizada por medio del Índice Estandarizado de Precipitación SPI-3 (McKee et al., 1993), La intensidad de la sequía es clasificada de acuerdo con el *National Drought Mitigation Center* (NDMC) (tabla 2).

Categoría	Posibles Impactos	Rango de SPI
Condición normal seco	Condiciones normales de precipitación	0 a -0.5
Condición anormal seco	Inicia la sequía, periodo corto en que se secan lentamente las siembras, cultivos y pastizales, empieza a haber peligro de incendios, déficit de agua, pasturas y cultivos no se recuperan completamente.	-0.5 a -0.8
Sequía moderada	Algo de daño a cultivos y pastizales, riesgo alto de incendio. Corrientes, represas y pozos con bajo nivel de agua, escasez de agua inminente, lo que implica la petición del cuidado del agua.	-0.8 a -1.3
Sequía severa	Posible pérdida de cultivos y pastos, riesgo de incendio alto, escasez de agua común, restricciones en el uso del agua.	-1.3 a -1.6
Sequía extrema	Pérdida mayor de cultivos/pasto, peligro extremo de incendios, restricciones estrictas de uso del agua.	-1.6 a -2.0
Sequía excepcional	Pérdida de cultivos/pasto excepcional y extendida, riesgo inminente de incendios, escasez de agua en represas, corrientes y pozos, creación de un estado de emergencia	-2.0 ó menos

Tabla 2. Clasificación de la sequía meteorológica de acuerdo con valores de SPI. Fuente: NDMC (2006).

Fernandes et al (2011) y Galván (2011) encontraron una fuerte correlación entre SPI-3 y los incendios forestales mostrando que el déficit de precipitación de tres meses es suficiente para estresar hídricamente la vegetación. La falta de precipitaciones en una región puede inducir días con menos cobertura de nubes provocando mayor insolación y aumento en la temperatura, siendo esto importante para secar aún más la vegetación e incrementar la probabilidad asociada a los incendios forestales. El SPI-3 indica un periodo en el que el déficit de lluvia acumulada puede producir una severa disminución de humedad en suelo y atmósfera, que estresan hídricamente la vegetación en niveles peligrosos.

Los datos para evaluar la sequía meteorológica fueron obtenidos de la base denominada SPI-PRECL0p5_3-month (Chen et al., 2002), disponibles en el *International Research Institute for Climate and Society* (IRI), la cual se obtiene en formato raster (malla) de 0.5 X 0.5 grados, disponibles desde marzo de 1948 hasta el presente, como ejemplo se presenta el mes de abril de 2011 (figura 9).

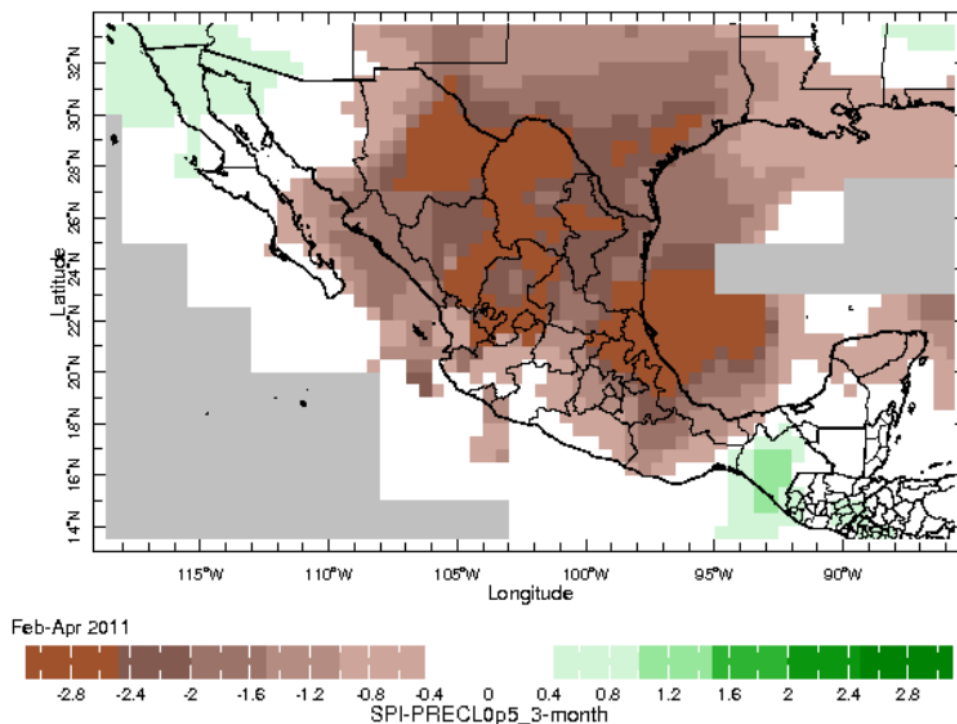


Figura 9. Datos originales de SPI-3 meses, SPI-PRECL0p5_3-month, para abril de 2011. Fuente: IRI.

2.2.2. Caracterización de la temperatura

Las altas temperaturas son un factor importante para aumentar el peligro climático ya que esto lleva a disminución de humedad relativa, induce mayor evapotranspiración y con ello estrés hídrico en la vegetación. Las redes de observación en superficie, constituidas esencialmente por estaciones meteorológicas, combinadas en ocasiones por estimaciones remotas, han provisto de datos a los sistemas de asimilación que permiten desplegar campos de temperatura en superficie (2 m sobre la superficie). Los sistemas de reanálisis de los grandes centros de pronóstico generan bases de datos en mallas de puntos regulares que permiten desplegar y obtener estadísticas relevantes para caracterizar el peligro climático de incendios forestales.

En la actualidad se puede acceder a diversas fuentes de datos de temperatura atmosférica con cobertura global, con diversas resoluciones espaciales y temporales. Para el presente trabajo se utilizó los datos proporcionados por la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA, 2004) mediante el Reanálisis Regional de América del Norte (NARR). Para el caso de estudio de abril de 2011 se utilizó la temperatura de superficie, los datos se obtienen en formato de malla con resolución de 0.3 X 0.3 grados, los cuales están disponibles desde enero de 1979 hasta la actualidad (figura 10). Posteriormente se integró esta variable como anomalía de temperatura al modelo de amenaza climática como se especificará más adelante.

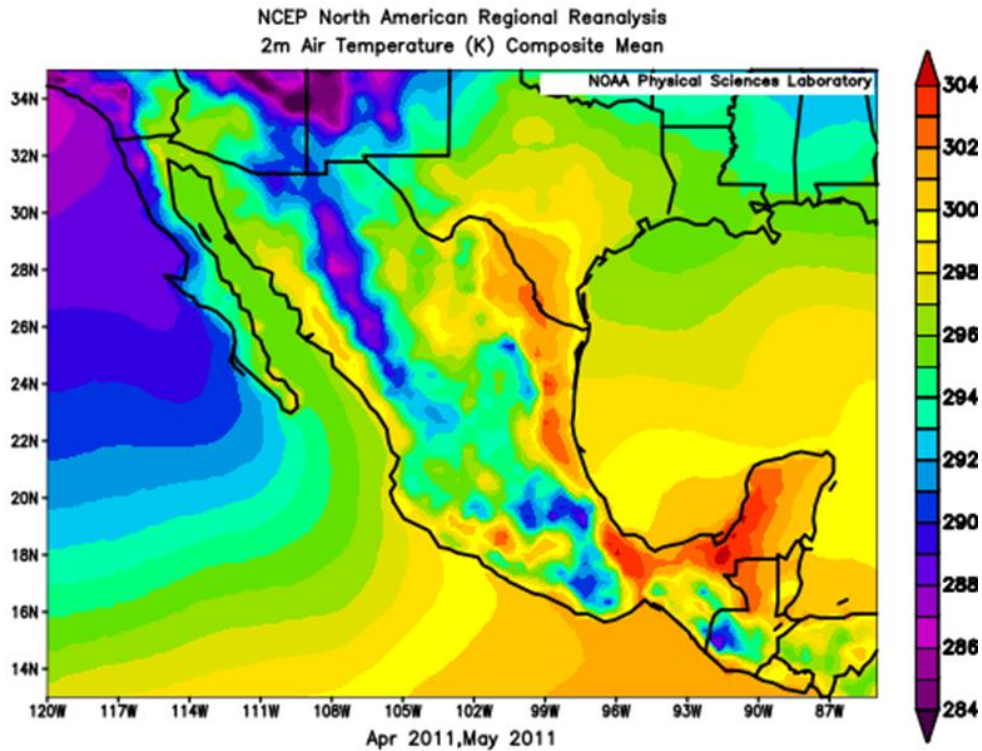


Figura 10. Temperatura del aire a 2m de la superficie para abril-mayo de 2011.
Fuente: NARR.

2.2.3. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

En respuesta al ciclo anual del clima, los ecosistemas vegetales presentan una condición relacionada a su actividad fotosintética, que puede ser analizada dependiendo principalmente de su respuesta a la disponibilidad de agua, cuando esta disminuye por efecto de una sequía meteorológica los ecosistemas reaccionan y disminuye su actividad fotosintética, lo que se le traduce en un estrés hídrico en la vegetación. Una forma de medir las condiciones de salud vegetal es por medio de índices vegetales, calculados con técnicas de sensoramiento remoto, para el presente estudio se utilizó el NDVI, con el cual es posible identificar el nivel de estrés hídrico o inclusive la muerte de la planta, se alcanza valores bajos cuando la vegetación tiene poca humedad y se manifiesta en sequedad o cuando se ha quemado después de un incendio forestal.

La propiedad de las comunidades vegetales de reaccionar al ciclo de lluvia anual es lo que permite analizar y determinar rangos de normalidad, así como identificar cuando el ecosistema está en una condición atípica de sequedad durante un periodo de sequía meteorológica. En ciertos años en que las lluvias se retrasan, o las temperaturas son anómalamente altas, se ocasiona un estrés hídrico en la vegetación durante los primeros meses del año, tal situación se ha presentado en México en los años 2005, 2006, 2011 y 2013. En estos años, el estiaje en el ciclo anual coincide con episodios de sequía, es decir se genera naturalmente una situación que constituye un peligro climático y aumenta el riesgo de incendio forestal dada las prácticas de roza tumba y quema en los meses de primavera. Con el inicio de las lluvias de verano, la recuperación del NDVI es rápida y en menos de un mes el NDVI alcanza valores cercanos a lo esperado. Sin embargo, en algunos casos, como en 2011 o 2013 el proceso puede ser un poco más lento cuando persiste la sequía meteorológica.

Por medio del IRI se obtuvo el NDVI para el caso de estudio de abril de 2011 (figura 11), la base de datos analizada corresponde a información del Servicio Geológico de EE. UU. (USGS) LandDAAC MODIS version_005 SNA (Huete et al., 2002), la cual presenta una resolución en malla de 250m x 250m, que corresponde a compuestos quincenales, disponible para el periodo de febrero de 2000 a marzo de 2017.

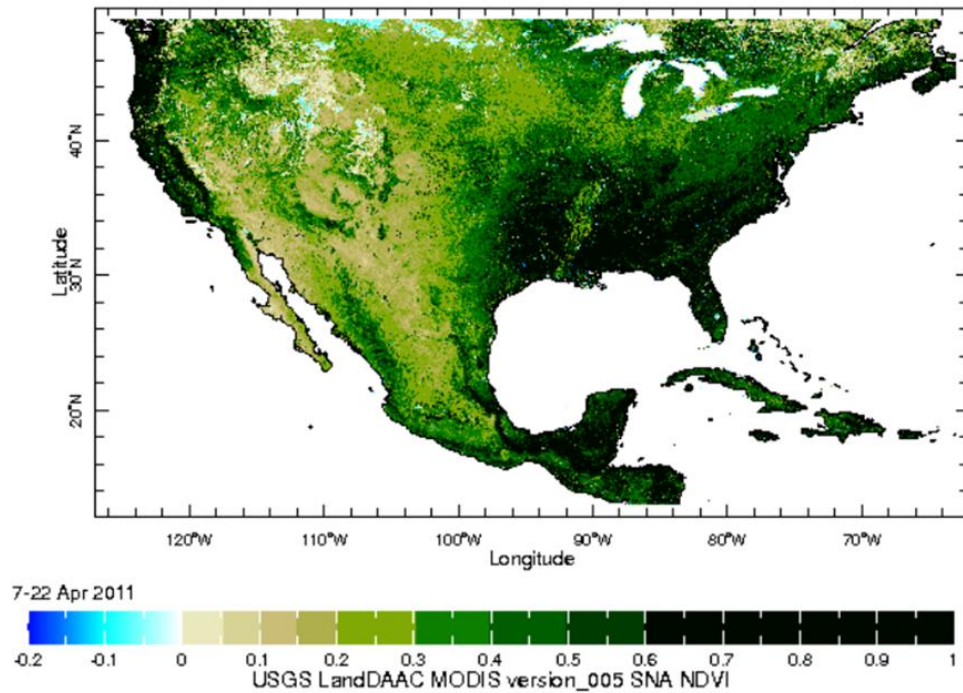


Figura 11. Datos originales de compuestos de NDVI del 7 al 22 de abril 2011.
Fuente: IRI-USGS.

Posteriormente los datos históricos de NDVI fueron procesados para la obtención de anomalías quincenales, los resultados identifican los lugares que presentaron en abril de 2011 áreas vegetales con alto grado de sequedad (valores negativos), lo que se traduce en mayor probabilidad de incendios. Posteriormente se integraron con el SPI-3 y las anomalías de temperatura para conformar el índice de amenaza climática.

2.2.4 Información meteorológica adicional

Pero los datos satelitales no se limitan a información de superficie. Mediante radares meteorológicos se puede estimar la actividad convectiva, en relación con la precipitación, o con las descargas eléctricas (figura 12). En ocasiones, las descargas eléctricas actúan como mecanismo disparador de incendios forestales (Minnich, et al., 2009). Estos datos no fueron incluidos en el modelo

de amenaza climática, debido a que son únicamente un detonante que representa el origen de los incendios naturales (1% en México), y solo se presentan como información complementaria.

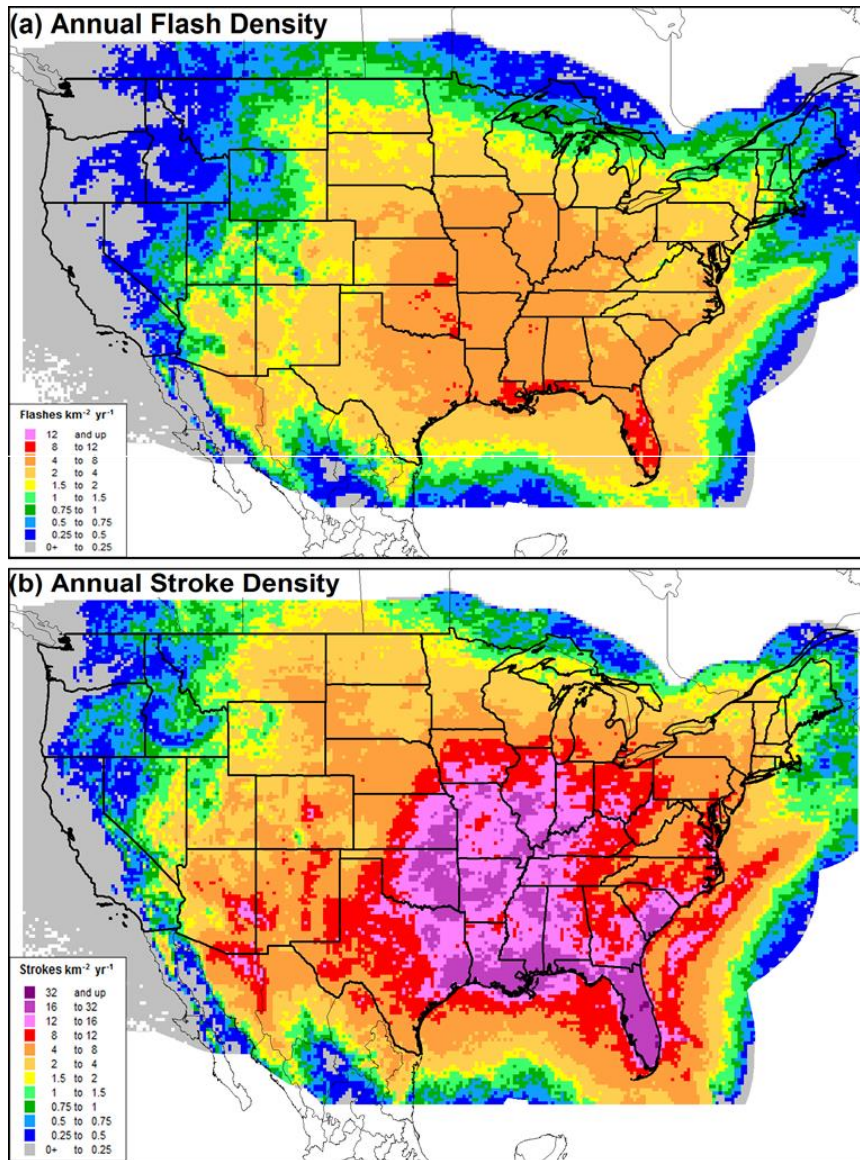


Figura 12. Relámpagos anuales (a) destellos por km^2 y (b) caída de rayos por km^2 en Estados Unidos y áreas adyacentes, con base en datos desde 2005 hasta 2014 (Holle y Cummins, 2016).

2.3. Cuantificación de la vulnerabilidad

Las variables que forman parte del modelo de vulnerabilidad poseen información relacionada con factores físicos, sociales y ambientales, en donde el uso del fuego es frecuente como en actividades agropecuarias, donde se quema intencionalmente con fines económicos, o donde la cultura ambiental de la sociedad y autoridades no se traduce en prevención a la hora de desarrollar ciertas actividades como el turismo, esto se refleja en la distribución de los incendios forestales a escala nacional. Los datos pueden obtenerse en dos tipos: cualitativos o cuantitativos. La información cualitativa (ej., tipos de vegetación) para poder ser integrada en el modelo de vulnerabilidad, necesita transformarse en datos numéricos, dichos valores fueron designados con base en la relación teórica que guarda cada variable con la presencia de fuego. Las diversas variables fluctúan en el tiempo (baja frecuencia), lo que refleja la naturaleza multifactorial y dinámica de la vulnerabilidad, sin embargo, para el caso de estudio del 2011 se utilizó un corte temporal de las variables involucradas alrededor de dicho año.

Según la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2010), las principales causas de los incendios forestales están relacionadas con el uso del fuego en actividades agrícolas o ganaderas. Sin embargo, la vulnerabilidad de los ecosistemas naturales puede aumentar por otras actividades humanas relacionadas con el cambio de uso de suelo, actividades forestales ilegales, fogatas de campistas, quema de basura o fuego para la caza furtiva, entre otras. Estos factores pueden representarse directa o indirectamente con datos que se utiliza como *proxy*. Como insumos para la creación del modelo de vulnerabilidad de incendios forestales a escala nacional, el presente estudio utilizó las siguientes variables:

- Uso de suelo y vegetación
- Áreas naturales protegidas
- Índice de influencia humana

El índice de vulnerabilidad a la sequía meteorológica se construyó promediando los valores normalizados (entre 0 y 1) de los tres indicadores expuestos anteriormente. Es de considerar que los factores de vulnerabilidad son dinámicos y deben actualizarse periódicamente (5 a 10 años).

2.3.1. Uso de suelo y vegetación

La información de Uso de Suelo y Vegetación (USV) es capaz de reflejar una de las causas más importantes de los incendios forestales, ya que en ella se incorpora las áreas destinadas a la agricultura, y por otro lado los tipos de vegetación que pueden reflejar su propio grado de susceptibilidad a incendiarse, lo que resulta en que la inflamabilidad refleja una condición que puede determinar la propagación del fuego (Pyrke y Marsden, 2005).

En México, este tipo de caracterización de la vulnerabilidad, basada en la susceptibilidad de los bosques y las selvas tropicales al fuego, ha sido desarrollado por CONABIO (1998) y Jardel et al. (2010). Sus resultados indican que ciertos tipos de vegetación tienen más probabilidad de incendiarse que otros, por ejemplo: por su ciclo anual de sequedad natural, la selva baja caducifolia es más vulnerable que una de bosques de pino de montaña, que, a su vez, son más vulnerables ante una sequía y con temperaturas elevadas, que los matorrales o pastos que pueden ser incendiados, pero la extensión del incendio es menor y su recuperación es más rápida que la vegetación arbórea. De esta manera es posible asignar a cada tipo de comunidad vegetal un valor normalizado (entre 0 y 1) y así, poder ser integrado en un índice de vulnerabilidad cuantitativo consolidado (tabla 3).

valor	tipo de vegetación
1	agricultura de humedad, agricultura de temporal, selva baja subcaducifolia, agricultura de riego, selva baja caducifolia
0.9	pastizal natural, bosque de pino, bosque de ayarín, pradera de alta montaña, sabanoide, sabana, matorral subtropical, chaparral, bosque de pino-encino, selva mediana caducifolia, matorral de coníferas, bosque de tascate, palmar natural, palmar inducido
0.8	selva mediana subcaducifolia, pastizal cultivado
0.7	vegetación halófila, popal, tular, bosque de cedro, bosque de oyamel, bosque cultivado, bosque de galería, selva alta subperennifolia, vegetación halófila hidrófila, manglar, selva baja espinosa subperennifolia, bosque mesófilo de montaña, matorral rosetófilo costero, selva baja perennifolia, selva alta perennifolia, matorral sarco-crasicaule, bosque inducido, vegetación de petén, matorral desértico rosetófilo, matorral sarco-crasicaule de neblina, selva baja espinosa caducifolia, vegetación de dunas costeras, vegetación de desiertos arenosos, selva de galería, matorral crasicaule, vegetación de galería, bosque de encino, matorral desértico microfilo, bosque de encino-pino, matorral submontano, matorral sarcocaulo
0.6	selva mediana perennifolia, mezquital tropical, selva mediana subperennifolia
0.5	pastizal inducido
0.4	matorral espinoso tamaulipeco, vegetación halófila xerófila, pastizal gipsófilo, vegetación gipsófila, mezquital desértico, bosque de mezquite, vegetación halófila, pastizal halófilo
0.3	asentamientos humanos
0.2	acuícola
0.1	zona urbana, sin vegetación aparente
0	cuerpo de agua, desprovisto de vegetación

Tabla 3. Valores asignados con base en la susceptibilidad de la vegetación al fuego propuesta por CONABIO (1998).

En este análisis de riesgo, se infiere que la exposición a la amenaza está implícita en la distribución espacial de los tipos de vegetación. Para este fin se utilizó la capa de USV del INEGI (Serie IV, 2009). Los polígonos fueron procesados para asignarles el valor de susceptibilidad a incendios (tabla 2). El formato vectorial original fue rasterizado, para poder ser integrado al modelo de vulnerabilidad, el cual posteriormente formó parte del modelo final de riesgo de incendios forestales por amenaza climática.

En el modelo de vulnerabilidad se tiene en cuenta que la vegetación, aunque sea susceptible al fuego de forma natural, no tiene que incendiarse bajo una sequía y calor extremo, para ello se necesita un factor que inicie el fuego, el cual en la mayoría de los casos puede estar asociado a las actividades agropecuarias, pero también diversas actividades humanas pueden producirlo y es necesario representarlas en el modelo.

2.3.2. Áreas Naturales Protegidas

Las políticas públicas federales con aplicación a nivel regional o local dirigidas a prevenir la ocurrencia de incendios forestales son un elemento clave para reducir la vulnerabilidad y su cantidad, disminuyendo así sus impactos. En las ANP, las prácticas de prevención de incendios son más eficientes que las que están fuera y hacen que estas regiones sean menos vulnerables a las condiciones secas y calurosas (CONANP, 2014). Estas políticas preventivas incluyen la tala controlada en los bosques para evitar la propagación de incendios, la eliminación de material combustible y la generación de habilidades entre el personal a cargo de la vigilancia forestal, debido a esto hace que las ANP sean menos vulnerables a la sequía y pueden estar representadas por un indicador de vulnerabilidad (CONANP, 2013a; CONAFOR, 2012).

Entre las ANP hay diferencias en su manejo (tabla 4) y este se puede ver reflejado en la “huella humana” que es un índice que muestra la transformación que las actividades humanas han hecho en los ambientes naturales (Sanderson et al., 2002). Es de entender que una ANP como los Santuarios en los cuales las actividades humanas son mínimas tenga menor probabilidad de incendios en su interior, que un Parque Nacional en el cual las actividades principalmente recreativas se presentan de manera habitual, elevando su probabilidad de presentar incendios forestales en su interior (figura 13).

Categoría	Objetivos
Reserva de la Biosfera	Conservación de los ecosistemas intactos o que deban obtener preservación o restauración, que contiene especies representativas a nivel nacional, endémicas o amenazadas. Zonas núcleo se limitan a la conservación, investigación y educación; zonas de amortiguamiento pueden ser utilizadas por las comunidades locales existentes de forma compatible con la conservación.
Parque Nacional	Conservación de los ecosistemas de importancia nacional debido a la belleza escénica, valor científico, educativo, recreativo o histórico, la presencia de flora y fauna, o potencial turístico. Sólo se permiten las actividades relacionadas con la protección de los recursos naturales, la investigación, el turismo y la educación.
Monumento Natural	Contener elementos naturales que son únicos o excepcionales, tienen interés estético, valor histórico o científico. Sólo se permiten las actividades relacionadas con la conservación, la investigación científica, la educación y la recreación.
Área de Protección de Recursos Naturales	Superficies destinadas a la preservación y protección de los suelos, las cuencas hidrográficas, las aguas y otros recursos naturales ubicados en tierras aptas para los bosques, incluidas las reservas forestales y las zonas de protección de las fuentes y cuerpos de agua. Sólo se permiten las actividades relacionadas con la preservación, la protección y el uso sostenible de los recursos naturales.
Área de Protección de Flora y Fauna	Establecida en áreas que contienen hábitat sobre el equilibrio y la preservación dependerá cuál de la existencia, el desarrollo y la transformación de la flora y fauna silvestres. Se permiten las actividades relacionadas con la preservación, repoblación, propagación, aclimatación, refugio, investigación y el uso sostenible de estas especies, así como la enseñanza o la sensibilización. También pueden ser sometidos a un uso sostenible ya existente por las comunidades locales.
Santuarios	Establecida en áreas con importante riqueza de flora y fauna, o por la presencia de especies, subespecies o hábitat de distribución restringida. Sólo la investigación, la recreación y la educación ambiental son permitidos.

Tabla 4. Categorización de ANP federales según su manejo (con base en CONANP, 2013b).

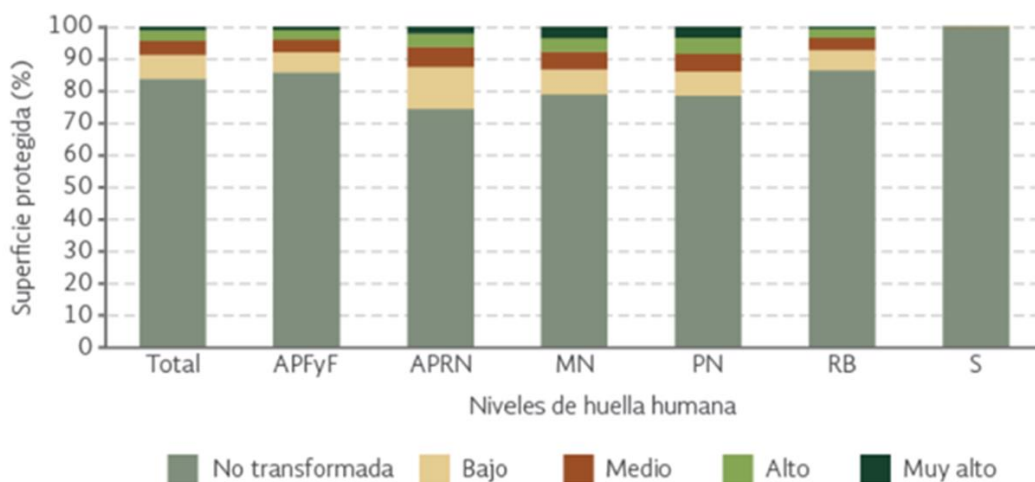


Figura 13. Grado de actividad humana en las ANP federales en México. Las ANP se clasifican en: área de protección de flora y fauna (APFyF), áreas de protección de recursos naturales (APRN), monumentos naturales (MN), parques nacionales (PN), reserva de la biosfera (RB) y santuarios (S) (Fuente: SEMARNAT, 2016).

De acuerdo con el grado de protección según su manejo, a las ANP se les asignó un valor entre 0 y 1 para poder ser integrado en el modelo de vulnerabilidad, también fueron agregadas áreas de conservación (CON) que no alcanzan el grado de ANP (tabla 5). Con base en los manejos por categoría de la CONANP

se puede clasificar de mayor a menor protección las ANP, para así representar con valores estandarizados su vulnerabilidad diferenciada. Posteriormente los polígonos de las ANP fueron rasterizados para poder ser integrados con las otras variables involucradas en el análisis.

Categoría de manejo	Valor de vulnerabilidad
RB	0.1
APFyF	0.2
APRN	0.3
MN	0.4
S	0.5
PN	0.6
CON	0.7

Tabla 5. Valor de vulnerabilidad asignado por tipo de ANP según su manejo.

2.3.3. Índice de Influencia Humana

El Índice de Influencia Humana (HII, por sus siglas en inglés) fue utilizado en el presente trabajo como *proxy* del efecto directo de las actividades humanas sobre los socioecosistemas. En él es posible identificar entre otros factores la densidad de la población en México y el mundo, especialmente en zonas rurales, esta información resulta fundamental para la construcción de la vulnerabilidad del socioecosistema por incendios. El HII está construido con base en ocho variables que reflejan la distribución espacial de la presencia humana (WCS-CIESIN, 2005):

- densidad de población
- áreas urbanizadas
- carreteras principales

- vías férreas
- líneas costeras
- ríos navegables
- grandes tipos de uso de suelo
- luces nocturnas

Como los incendios en México tienen un origen del 99% por causa de alguna actividad humana (CONAFOR, 2010), este índice ayuda a identificar los lugares con más probabilidades de incendio. Los elementos que conforman el HII son identificados a escala global mediante técnicas de sensoramiento remoto e información poblacional de cada país. La escala espacial del HII se obtiene a 1 km de resolución y sus unidades varían de 0 a 64, donde 0 representa ninguna influencia humana (ej., áreas vírgenes) y 64 representa la máxima influencia humana (ej., ciudades), estos valores posteriormente fueron normalizados y reescalados para su integración en el modelo de vulnerabilidad.

2.4. Consideraciones para la integración de datos

En el compuesto de las tres variables anteriores, un socioecosistema resultará vulnerable cuando está en constante interacción con actividades humanas que generan incendios (turismo, agricultura, vías de comunicación, ganadería, falta de protección, entre otros). Dentro del modelo de riesgo de incendio forestal, el modelo de vulnerabilidad funge como base y será integrado posteriormente con el modelo de amenaza climática.

La construcción del modelo de riesgo resulta complejo al incluir diversas fuentes de datos, con geometrías diferentes, unidades métricas y diversas temporalidades. Un tipo de información relevante con la que se construyó el

modelo de riesgo de incendios forestales es la proveniente de datos satelitales, los cuales representan fenómenos naturales o aspectos del desarrollo social que se han puesto a disposición pública en forma de arreglos matriciales (mallas), con resoluciones espaciales y temporales que pueden ser aprovechados para caracterizar peligros naturales o vulnerabilidad. Al considerar la diversidad de bases de datos, la necesidad de su procesamiento y el despliegue de resultados se decidió que la integración fuera dentro de un Sistemas de Información Geográfica (SIG), que permite organizar y procesar capas de información en diferentes formatos (vectorial o raster), con diversas resoluciones temporales que incluyen horas, días, meses, años o décadas y con diversas resoluciones espaciales (de metros a kilómetros), que representan lo local, regional o global (figura 14).

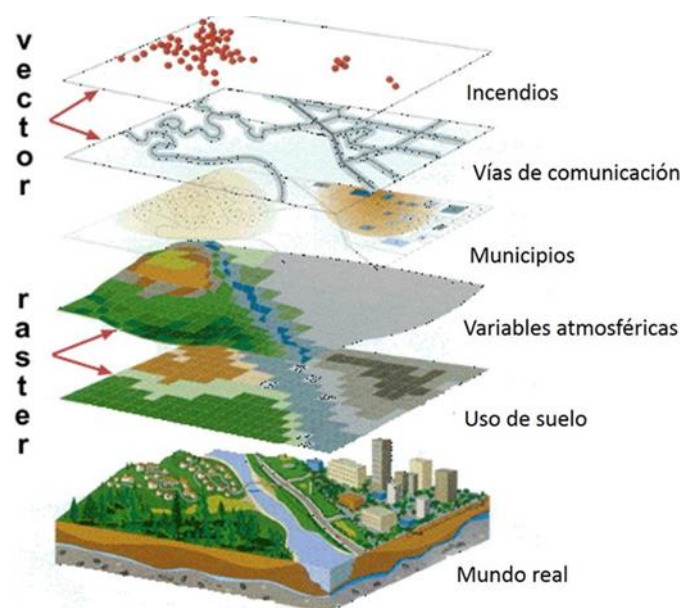


Figura 14. Ejemplo de la integración de información espacial en un SIG.
Fuente: modificado de ESRI, 2013.

En la actualidad los SIG están ampliamente aceptados en las Geociencias, sin embargo, su uso en ocasiones queda limitado a la visualización de datos. Trabajar con un SIG permite realizar operaciones para la creación de índices a partir de indicadores o bases de datos, lo cual resulta de gran conveniencia en la estimación del riesgo. Mediante métodos de gestión de datos usando el SIG

se relacionaron variables medioambientales y socioeconómicas, que están ligadas íntimamente con la caracterización de la amenaza (clima) y el contexto en que condiciones socioeconómicas generan vulnerabilidad (uso del fuego) (TABLA 6). Un SIG, como el ArcGIS 10.x, permitió obtener estimaciones de riesgo y comparar con los impactos (ej., puntos de calor por satélite) para validar dichas estimaciones, siguiendo una aproximación del tipo *ex-post*. El uso de pronósticos climáticos para estimaciones del peligro permitió generar escenarios de riesgo *ex-ante*, complementando de esta manera la generación de información útil para la toma de decisiones.

Amenaza climática	Resolución	Formato
SPI-3	0.5° x 0.5°	raster
Anomalía de temperatura	0.3° x 0.3°	raster
NDVI	250 m x 250 m	raster
Vulnerabilidad	Resolución	Formato
HII	1 km x 1km	raster
ANP	no aplica	polígonos
USV	no aplica	polígonos

Tabla 6. Variables integradas en el modelo de riesgo.

2.5. Hacia una estimación del riesgo

Los datos atmosféricos, socioeconómicos y ambientales son el insumo para generar estimaciones de peligro, de vulnerabilidad y un modelo de riesgo, que lleve a generar escenarios probabilísticos de ocurrencia de incendios forestales, usando escenarios, pronósticos o predicciones de amenaza climática. Como ejemplo de lo anterior, en este trabajo se presenta como caso de estudio los incendios ocurridos durante la primavera del 2011.

Una evaluación del riesgo climático requiere la caracterización del peligro natural y los factores de vulnerabilidad. Para este propósito, Neri y Magaña (2016), utilizaron datos climáticos para caracterizar el nivel de peligro por sequía meteorológica. Propusieron un marco conceptual para estimar el riesgo caracterizando el peligro natural mediante uso del SPI (McKee et al., 1993, 1995), y mediante indicadores socioeconómicos y ambientales, construyeron un índice de vulnerabilidad ante la sequía meteorológica.

Para el caso de riesgo de incendios forestales por amenaza climática (sequía meteorológica), el proceso de evaluación requiere la identificación de las variables meteorológicas que afectan los estados de salud hídrica de la vegetación, haciéndola susceptible de ser afectada por el fuego en mayor medida que una vegetación sin estrés hídrico. Es común que en los trópicos y subtropicos una condición de sequía meteorológica implique temperaturas elevadas y humedad reducida.

El análisis jerárquico o estructural de las variables (por medio de indicadores) consiste en determinar la influencia de cada variable en la presencia de incendios, con el fin de identificar su importancia utilizando matrices de relaciones en tiempo y espacio (Barbat, 2003). Derivado de los análisis de relación entre los incendios forestales y las posibles variables que influyen en su ocurrencia se tiene como tarea analizar los patrones espaciotemporales de factores que influyen en la vulnerabilidad a escala nacional relacionados con la presencia de incendios. Esto ayuda a identificar el modulador de baja frecuencia de la actividad de incendios en diversos socioecosistemas. La historia de los indicadores se convierte en insumo para construir un modelo de vulnerabilidad, el cual funge como componente del modelo de riesgo.

La amenaza climática que afecta a los socioecosistemas en alta frecuencia se incorpora de manera dinámica cuando se producen las condiciones que secan la vegetación, lo que aumenta la cantidad de combustible y el riesgo de incendios

forestales. Cuando un peligro climático se manifiesta en un evento de amenaza, como la sequía meteorológica en el norte de México durante 2011 (Magaña et al., 2018), la magnitud y las características espaciotemporales de un índice de amenaza como el SPI-3, permite incorporarse al cálculo del riesgo. Una evaluación mensual del riesgo climático debe explicar en forma aproximada la actividad del desastre (incendios forestales) que ocurre en una región tanto en su distribución espacial como temporal.

En resumen, cuando el peligro natural se materializa en una amenaza en combinación con la vulnerabilidad del socioecosistema da como resultado el riesgo climático de incendios forestales y debe explicar su ocurrencia (figura 15).



Figura 15. Diagrama esquemático de los componentes del riesgo de incendio forestal. Variables propuestas para el análisis individual del peligro y la vulnerabilidad.

2.6. Integración de la vulnerabilidad y amenaza climática

Para integrar espacialmente los indicadores de vulnerabilidad y peligro o amenaza, todas las variables del modelo de riesgo fueron reescaladas de forma directa a mallas de 250 x 250 m, similar a la cuadrícula de los datos NDVI, la cual posee la mayor resolución de todas las variables. Así, se aprovecha el detalle que aporta el índice de vegetación al combinarse con datos de menor resolución espacial.

El índice de amenaza climática fue construido con tres variables cuantitativas (SPI, temperatura y NDVI) que fueron normalizadas con la siguiente ecuación:

$$Vr(t) = \frac{\alpha(t) - \min(\alpha)}{\max(\alpha) - \min(\alpha)}$$

donde $Vr(t)$ se refiere al valor normalizado de cada variable cuantitativa, $\alpha(t)$ es la variable a normalizar, mientras que $\max(\alpha)$ y $\min(\alpha)$ corresponden a su valor máximo y mínimo.

Las variables de vulnerabilidad como las zonas protegidas de conservación y el USV son variables cualitativas, a las que se les asignó un valor entre 0 y 1 con base en su condición de prevención de incendios. Dichas variables se integran de manera normalizada con el índice de influencia humana HII, el cual fue modificado de sus valores originales de 0 a 64, a valores de 0 a 1. De esta manera es posible integrar un índice de vulnerabilidad de incendios forestales en donde los diversos factores tienen diversos pesos. Regionalmente, algunos de los factores pueden tener mayor importancia. Por ello, los tres factores de vulnerabilidad, cuantificados en términos de indicadores, se integraron en un índice consolidado de la vulnerabilidad de los socioecosistemas. Una mayor ponderación (0.5) en el promedio fue dada a la HII, principalmente por la relación

de los incendios forestales con la densidad de la población rural. Las políticas públicas relacionadas con el nivel de protección o la gestión del ecosistema, así como las características de la vegetación expuesta, recibieron una ponderación de 0.25. El modelo de riesgo queda compuesto por medio de un índice de vulnerabilidad y uno de amenaza climática, integrados para dar como resultado un índice de riesgo de incendio por amenaza climática para cada punto de malla de 250 x 250 m en la República Mexicana.

2.7. Una aproximación cuantitativa del riesgo de incendios

El riesgo climático se calculó en términos de las probabilidades de un peligro natural, multiplicado por la vulnerabilidad, estos índices reflejan las condiciones sociales, económicas y ambientales que hacen propenso a un socioecosistema a experimentar daños (Neri y Magaña 2016).

La probabilidad de una sequía meteorológica calculada con el SPI dado un valor inferior a -1, es de alrededor del 16%, pues este índice se da en términos de desviaciones estándar considerando una normalización de la precipitación mes a mes. Como propone Neri y Magaña (2016), las condiciones observadas (ej., caso de la primavera del 2011) se consideran como eventos de amenaza, con una magnitud ($SPI < -2$) y duración de casi un año. En cuanto a la temperatura, las probabilidades de anomalías de temperatura positivas son del 50%, al igual que la probabilidad de una anomalía negativa del NDVI. En consecuencia, la probabilidad conjunta del peligro natural que puede provocar incendios forestales es del orden de aproximadamente el 4%, es decir, una condición climática peligrosa de este tipo puede ocurrir aproximadamente una vez cada veinticinco años. Sin embargo, los incendios forestales en México ocurren con mucha mayor frecuencia que eso. Esto implica que las probabilidades de incendios forestales deben incluir la vulnerabilidad para explicar las tendencias actuales o la distribución espacial de la actividad de los incendios forestales (Ávila et al., 2010;

Pompa et al., 2018). En pocas palabras, el peligro climático no explica los desastres, sino que debe ser el riesgo el elemento que explique el por qué se inician tantos incendios forestales, aun cuando en ciertos años la amenaza no es alta. La extensión de superficie quemada, sin embargo, si está más relacionada con la condición de estrés hídrico de la vegetación, resultado de sequía y altas temperaturas.

Los resultados de las evaluaciones de riesgo y desastre se presentan en mapas en que los valores son escalas en cinco niveles (muy alto, alto, medio, bajo y muy bajo), al igual que se trabaja con peligro, amenaza y vulnerabilidad en forma individual. Sin embargo, debe reconocerse que a pesar de contemplarse variables que reflejan comportamiento humano para representar la vulnerabilidad, persiste mucha incertidumbre en este factor y puede hacer que esta variable en ciertas zonas no quede tan bien representada como en otras partes del país. Esto indica que hay actividades que no están siendo bien representadas en el HII y que requieren un tratamiento o estudio específico. Las actividades ilegales que causan incendios (ej., narcotráfico) son quizá las más difíciles de representar y constituyen una fuente importante de incertidumbre en ciertas zonas. Dicha conclusión aparece cuando se hace la evaluación del modelo contra una medida de la actividad de incendios forestales.

2.8. Evaluación del desastre

Para caracterizar el desastre se utilizaron los *hotspots* o puntos de calor detectados por medio de técnicas de sensoramiento remoto, resultado de algoritmos aplicados a los datos del *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS, colección 6), cuya información espacial se representa por medio del cálculo de temperatura que alcanza un grado de saturación que refleja directamente la actividad potencial de un incendio. Los datos tienen resolución espacial de 1 km donde pueden ocurrir uno o más

incendios de menores dimensiones. Los datos están disponibles con una temporalidad diaria desde el año 2001. Su origen puede estar relacionado con incendios forestales, quemas agrícolas, suelos calentados por el sol, grandes chimeneas (llamas de gas en pozos petroleros), volcanes activos, etc. La base de datos de puntos de calor se obtuvo del *Fire Information for Resource Management System* (FIRMS) de la NASA, los datos se procesaron para el territorio nacional durante el periodo 2001-2015.

Por medio de la cartografía de uso de suelo y vegetación, se clasificaron los puntos de calor, para no considerar los que no corresponden a vegetación natural (ej., chimeneas volcánicas o pozos petroleros). Solo se tomaron en cuenta para el análisis los puntos de calor con alto grado de confianza (mayor a 80%).

La actividad de puntos de calor se comparó con las estimaciones de riesgo histórico. El trabajo se complementó con un caso de estudio para la primavera de 2011, cuando una sequía meteorológica severa y prolongada afectó al norte de México. La evaluación del modelo de riesgo histórico y el modelo espacial para el episodio de 2011, se realiza comparando los rangos de riesgo con la densidad de los puntos de calor observados. El número y la ubicación de los puntos de calor también son comparados con el modelo de amenaza climática (año 2011) y el de vulnerabilidad, para establecer la ventaja de usar estimaciones de riesgo. En otras palabras, se compara el riesgo calculado con el desastre observado, para evaluar la certidumbre del modelo.

2.9. Capacidad de pronosticar el riesgo de incendios forestales por amenaza climática

Se realizó una aproximación que pretende contribuir al reto de diagnosticar el peligro y la vulnerabilidad, así como la capacidad de pronosticar la amenaza, para hacer una gestión preventiva del riesgo por medio de alertas tempranas de incendios forestales, que permita a diversos sectores transitar hacia la prevención.

Pronosticar constituye un reto científico que implica entendimiento de los procesos en un sistema. El pronóstico de incendios forestales, donde la actividad humana representa una componente importante, resulta particularmente complicado, porque implica tratar de predecir el riesgo con base en el comportamiento espaciotemporal de los incendios regulados por la conducta humana (ej. turismo en bosques durante vacaciones de Semana Santa, durante la temporada más seca y cálida del año). Esto claramente no es exacto y por ello debe hacerse referencia a la incertidumbre que tal suposición conlleva.

Para el caso de predecir actividad de incendios forestales es necesario vincular procesos ambientales a la gobernanza y a la comunicación de riesgo entre la sociedad, además de tratar los patrones y procesos en diversas escalas espaciales y temporales, así como las dificultades de combinar distintas fuentes de datos ambientales, sociales, económicos y físicos, tanto en mediciones *in situ*, como estimaciones remotas, con análisis estadísticos que intentan representar una variable tan complicada como lo es el comportamiento humano.

El trabajo aquí desarrollado se vuelve novedoso porque intenta pasar de la explicación de lo sucedido a una propuesta que permite hacer pronóstico de lo que vendrá, en este caso de la actividad de incendios forestales. El fin último de tal aproximación es que las autoridades competentes puedan aprovechar este concepto y pasen a la prevención como estrategia de gestión, más que a la

respuesta a la emergencia. Hoy en día se exige que se aumente el presupuesto a agencias como la CONAFOR, con el fin de ampliar sus capacidades para combatir incendios. Dicha estrategia resulta inapropiada porque mantiene la filosofía de respuesta al desastre en lugar de prevenirlo. Económicamente, prevenir los incendios es más barato que combatirlos, y por ello, las autoridades deben contemplar formas de reducir el riesgo de manera estructural y utilizando los pronósticos de riesgo, como los que aquí se desarrollan.

La prevención de desastres requiere el diagnóstico y la gestión del riesgo mediante la reducción de la vulnerabilidad. Sin embargo, el poder emitir alertas tempranas, con base en la probabilidad de que un peligro se presente como una amenaza, con antelación de al menos un mes, resulta en información útil para la toma de decisiones encaminadas a la reducción de la vulnerabilidad. Lo anterior requiere un buen entendimiento de diversas formas de variabilidad climática, la determinación de la capacidad de pronóstico, generar los esquemas de cómo comunicar con claridad dicha información y establecer la confianza en las proyecciones de impacto. Esto se enmarca en la esencia de la gestión de riesgo ante extremos del clima.

Con base en lo anterior se considera el uso de un modelo de pronóstico climático para determinar su integración, se presenta el caso de estudio de abril de 2011, con datos de anomalía de temperatura y precipitación. Los datos utilizados corresponden a los pronósticos proporcionados por el *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (GFDL) para abril, pronosticado en marzo de 2011 (NOAA GFDL 2014; Kirtman et al., 2014). La fuente de información se denomina GFDL-CM2p1 y es distribuida por el IRI mediante su plataforma web (figura 16).

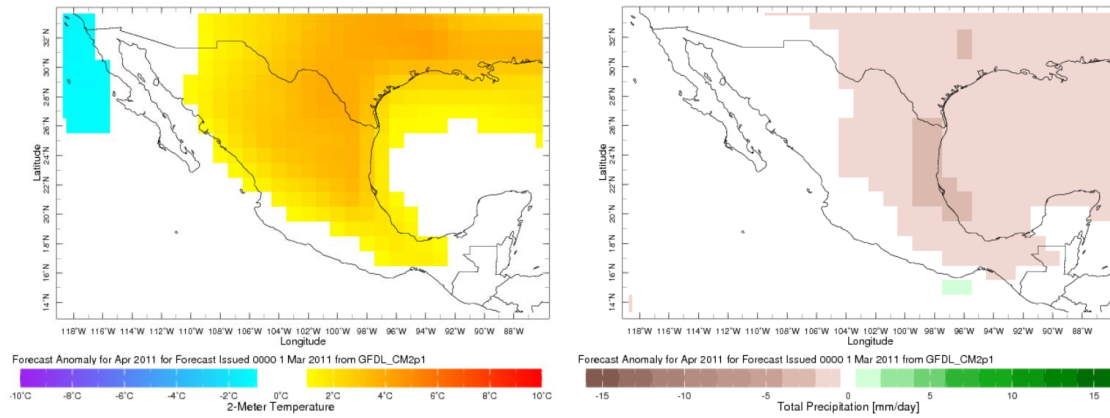


Figura 16. Pronóstico climático de anomalías de temperatura y precipitación realizadas en marzo para abril de 2011. Fuente: IRI-GFDL

Los datos de temperatura y precipitación pronosticadas se normalizaron y reescalaron a 250m para ser integrados con los datos de vulnerabilidad, y así poder generar el pronóstico de riesgo estimado con datos de amenaza climática.

Capítulo 3

Resultados

3.1. Riesgo de incendios forestales: comportamiento temporal-regional

Los incendios forestales tradicionalmente se relacionan con las sequías meteorológicas, las cuales, aunque recurrentes, no siempre poseen periodicidad. En México, las sequías meteorológicas son la respuesta de la atmósfera a diferentes forzantes del océano y la atmósfera, los cuales fluctúan en periodos que van de años a décadas. El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) aumenta las probabilidades de un verano seco para el centro-sur de México. La Niña puede llevar a sequía de gran intensidad en el norte del país (Magaña, 1999). La Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO, por sus siglas en inglés) o la Oscilación del Pacífico Norte (PDO) son también moduladores de baja frecuencia del clima en México, particularmente de las sequías (Méndez y Magaña, 2010). Los incendios forestales, a pesar de que se relacionan con periodos secos, también ocurren en momentos en que las condiciones son relativamente húmedas, lo que demuestra que este tipo de desastre está relacionado no solo con condiciones climáticas adversas, sino en gran medida, con las actividades humanas que hacen que los ecosistemas forestales sean vulnerables.

No ha habido una tendencia clara en la actividad de sequías o periodos húmedos en las últimas décadas desde mediados del siglo XX, ya sea en el norte o en el sur de México. Sin embargo, el número de incendios forestales ha aumentado en forma constante, lo cual puede estar relacionado principalmente con factores de vulnerabilidad en buena medida resultado de una mayor ocupación y explotación de los recursos naturales. Se estima que la población rural en México ha aumentado en 0.5% por año, por lo que aumentó de 33 millones en 1970 a

más de 58 millones en 2015 (Banco Mundial, 2017). La tendencia al aumento del número de incendios forestales en México en décadas reciente puede explicarse en buena medida por la actividad humana. En ciertos años, las sequías tienden a favorecer un aumento súbito en la cantidad de incendios, y por ello, es la combinación entre el peligro climático, sequía, y la condición de vulnerabilidad, actividad humana, lo que explica la presencia de incendios forestales.

Se realizó una primera estimación del riesgo de incendios forestales a nivel promedio espacial del norte y sur de México (considerando el paralelo de 22° norte), a partir de la combinación de información sobre el aumento de la población rural y datos del SPI-3 permite explicar la actividad de incendios, es decir, el riesgo puede explicar el desastre (figura 17). En años en que se presentan sequías meteorológicas hay un aumento en el riesgo que corresponde a una mayor cantidad de incendios, particularmente en el norte de México (Pompa et al., 2018), como es el caso de 2011 que corresponde a un periodo de sequía severa. Cuando hay una presencia mínima de incendios forestales se relaciona con condiciones normales o húmedas de invierno-primavera. Por ejemplo, 2014 fue una primavera anormalmente húmeda en la mayor parte de México y hubo relativamente pocos incendios. Sin embargo, a pesar de buenas condiciones climáticas, la tendencia a más incendios forestales se mantiene.

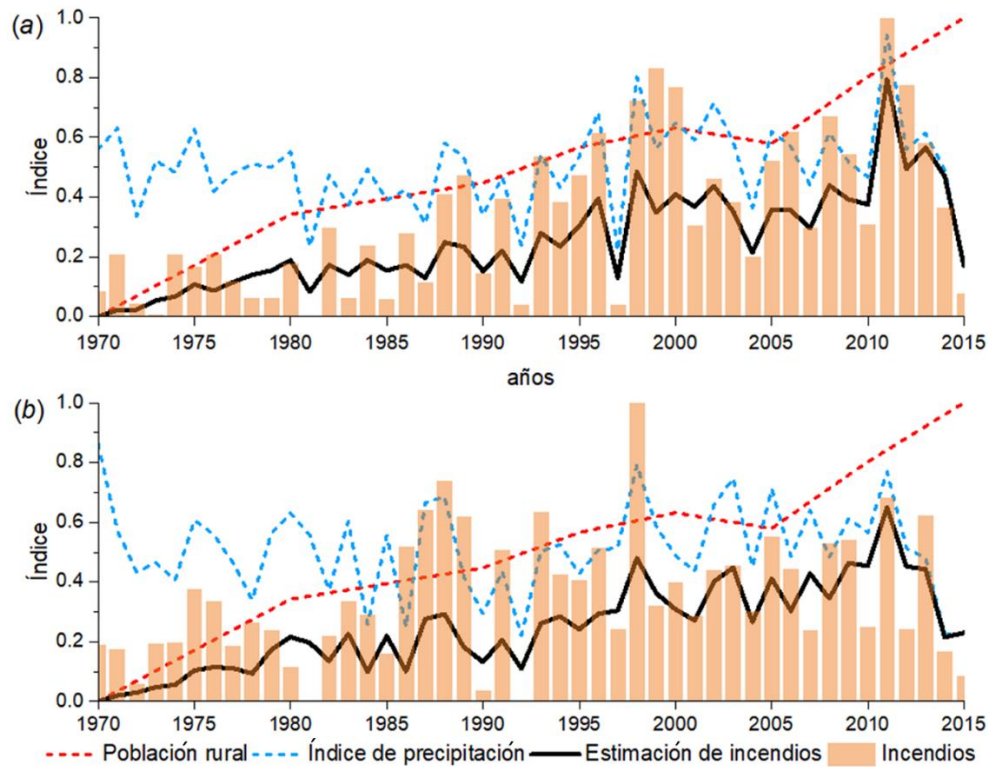


Figura 17. Riesgo histórico de incendios forestales entre 1970-2015. Línea punteada azul, serie de tiempo de SPI-3 (marzo a mayo) (*-1) normalizado entre 0 y 1, nivel de peligro; línea de puntos rojos, población rural normalizada entre 0 y 1; línea continua negra, riesgo estimado; y barras naranjas, número de incendios reportados. a) norte de México; b) sur de México.

La correlación entre riesgo y número de incendios forestales es de 0.85 para el norte de México y 0.54 para el sur de México. En la primera aproximación, esta correlación refleja principalmente la coherencia en las variaciones de alta frecuencia reguladas por la variabilidad climática con el desastre. Las sequías meteorológicas intensas aumentan las posibilidades de incendios forestales, especialmente en el norte de México, mientras que los incendios en las regiones centrales del sur parecen depender en mayor medida de factores humanos. En otras palabras, la frecuencia de grandes incendios forestales en el norte está mayormente relacionada con las amenazas climáticas, mientras que la actividad de incendios en el sur depende en mayor medida de la vulnerabilidad regional de los socioecosistemas.

3. 2. Caso de estudio: incendios durante la sequía de 2011

Durante 2011, en México se presentó una de las sequías meteorológicas más intensas de épocas recientes, principalmente en el noreste del país (figura 18), lo que derivó en temperaturas máximas extremas en marzo y abril, que favorecieron la presencia de incendios forestales de grandes dimensiones en bosques de coníferas y pastizales en el norte del estado de Coahuila. Los incendios en 2011 son uno de los desastres ambientales más severos de la historia reciente de México.

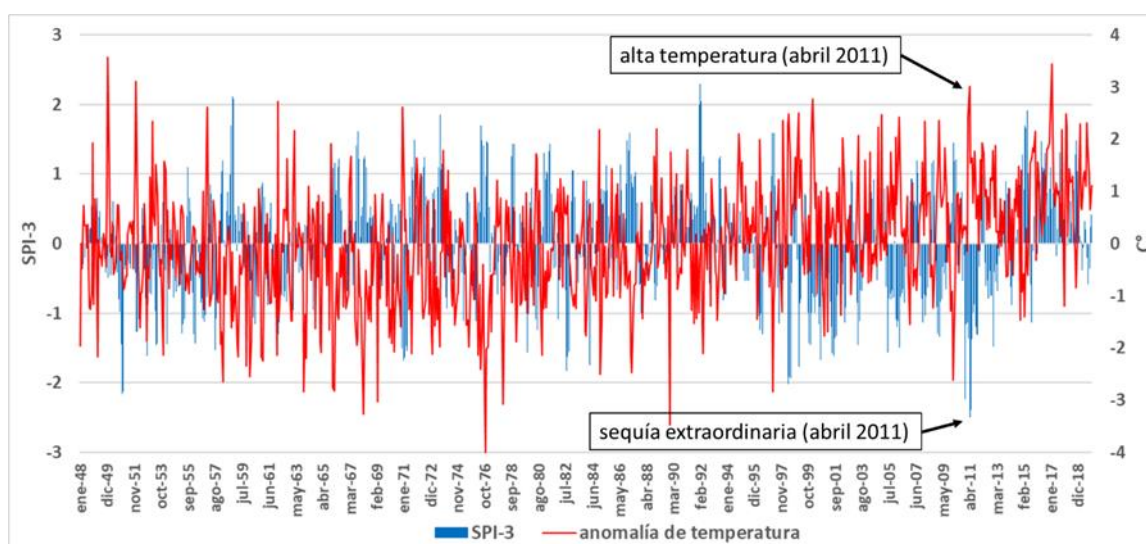


Figura 18. Índice Estandarizado de Precipitación de tres meses (SPI-3) y anomalía mensual de temperatura, en el noreste de México.

La ocurrencia de un incendio forestal es identificada por medio de puntos de calor detectados por satélites. Para los meses de abril y mayo de 2011, la vegetación principalmente afectada fue de bosque de encino, encino-pino y pino, y en sus alrededores el chaparral y el matorral desértico. A pesar de que dentro de la ANP Maderas del Carmen cuenta con el mismo tipo de vegetación que CADNR 004 Don Martín, esta zona no resultó afectada, por la diferencia en su manejo, siendo la primera un Área de Protección de Flora y Fauna (APFyF) mientras que la segunda un Área de Protección de Recursos Naturales (APRN). De igual forma, los incendios de matorrales en la ANP Ocampo (APFyF), fueron

contenidos en los límites al sur de su área, por prácticas de prevención (figura 19).

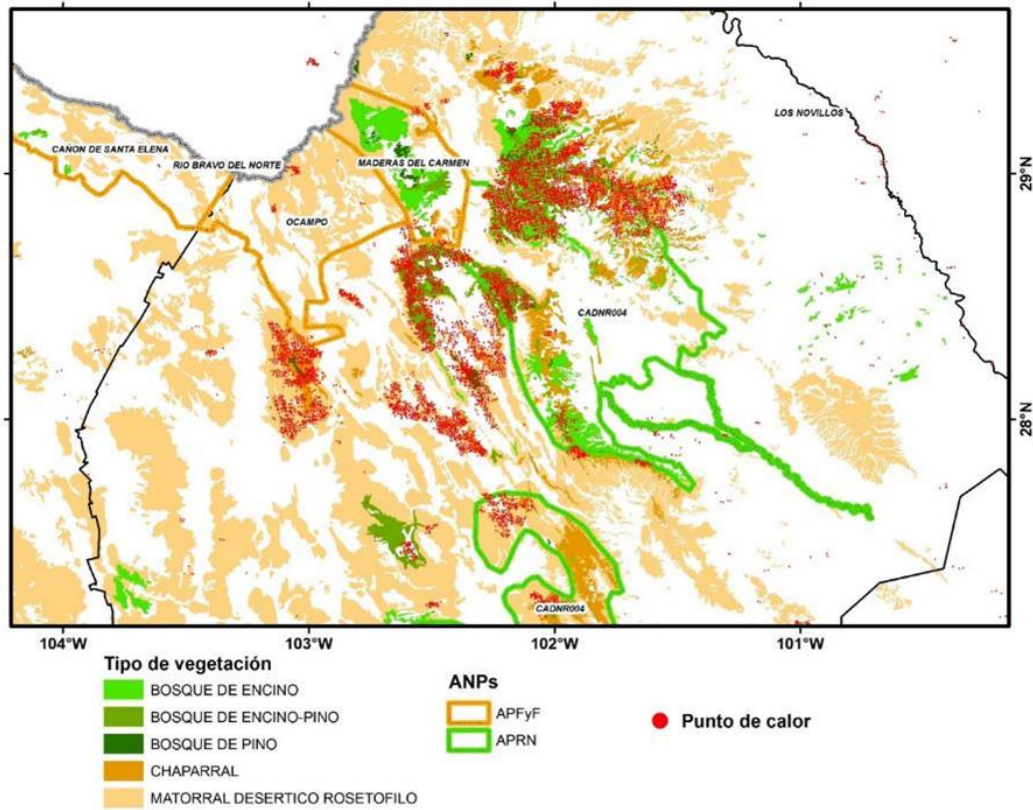


Figura 19. ANP en el norte de Coahuila y distribución de incendios forestales (puntos de calor) durante abril y mayo 2011.

El impacto resultante de los incendios forestales en los socioecosistemas se puede diagnosticar por medio de los cambios en el NDVI. Por ejemplo, en un bosque de coníferas de Coahuila, la afectación por los grandes incendios se refleja en una caída significativa en los valores de NDVI, sin alcanzar su recuperación en 10 años (figura 20).

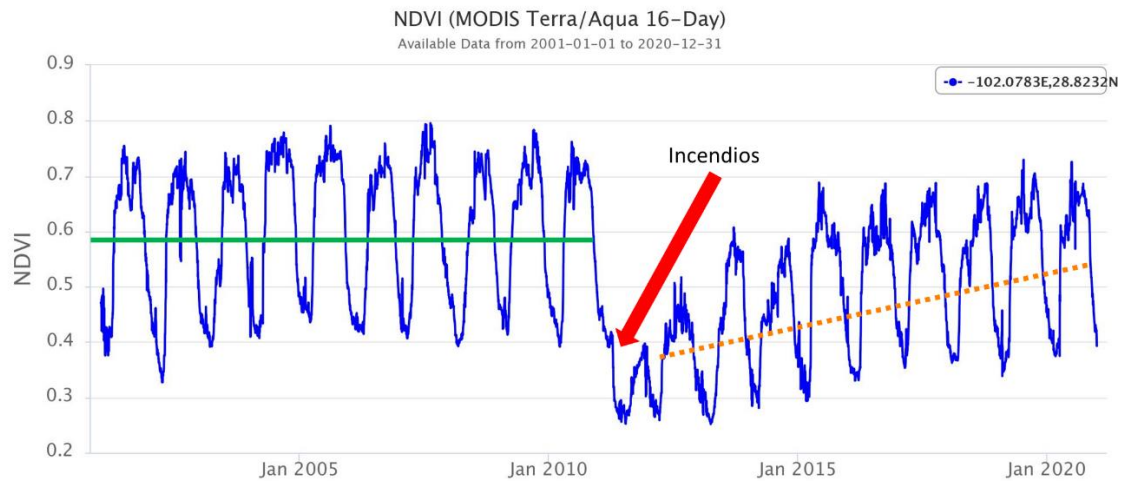


Figura 20. Compuestos de NDVI (16 días) en bosque de encino en el estado de Coahuila (2001-2020). Línea verde (sólida) valores medios de NDVI antes del incendio, línea naranja (punteada) tendencia de recuperación en 10 años.
Fuente: elaboración propia con datos de Climate Engine.

Lo anterior muestra que el uso de información satelital sirve para documentar el peligro y los impactos de un desastre, como los incendios forestales en el territorio nacional. Si bien existe información sobre los incendios forestales que CONAFOR entrega a nivel estatal o municipal, la información satelital aporta detalles espaciales y temporales, que los vuelven fundamentales en el análisis de riesgo.

Por la magnitud de su impacto, los incendios forestales en el año 2011 son seleccionados como caso de estudio para proponer un modelo de riesgo. Las componentes de peligro y vulnerabilidad se diagnosticaron bajo la metodología aquí propuesta, para un caso extremo como este deben generar un modelo de riesgo que explique un desastre de grandes dimensiones.

3.2.1 Modelo de riesgo de incendios forestales

El riesgo puede ser diagnosticado en primera instancia considerando que cuando este se materializa se convierte en desastre. Por tanto, la reconstrucción de la actividad de desastres recientes permite una primera aproximación de dónde y en qué condiciones el riesgo es mayor. Ajustando variables que pueden estar involucradas con la presencia de incendios forestales se inicia la construcción de un modelo de riesgo. Una forma de manejar los datos climáticos y los indicadores de vulnerabilidad es por medio de la estandarización de los datos, para que de esta manera sea posible crear relaciones numéricas coherentes entre variables.

El modelo de riesgo de incendios forestales que se propone en el presente estudio se basa en las condiciones de amenaza climática que prevalecieron durante el mes de abril de 2011, sobre un escenario de vulnerabilidad a escala nacional. Se busca identificar los contrastes espaciales en el riesgo de incendios forestales, bajo las condiciones de sequía y que prevalecieron durante este periodo, en el que se quemó una gran área (alrededor de 300,000 hectáreas) de pastos, bosques y selvas tropicales, principalmente en el norte de México. La severa sequía meteorológica afectó gran parte del territorio mexicano (Zúñiga et al., 2017b), pero las áreas más dañadas fueron aquellas con mayores niveles de vulnerabilidad.

La amenaza climática relacionada con la sequía se caracteriza mediante el uso del índice SPI-3 para los meses de primavera de 2011 (figura 21a). Cuando el $SPI-3 < -2$ se considera que ocurre una sequía meteorológica excepcional (tabla 2). Bajo tales condiciones climáticas la frecuencia de días con cielos despejados es mayor, lo que conlleva a un menor albedo incrementando las temperaturas máximas de superficie. Por esta razón, las altas temperaturas son más frecuentes durante las sequías meteorológicas y juegan un papel importante en

el análisis de la presencia de incendios forestales, ya que inducen a una mayor evapotranspiración provocando estrés hídrico en la vegetación.

Durante la primavera 2011, las anomalías de temperatura en la región norte y centro de México fueron entre 2 y 3°C (figura 21b). Con tal aumento en la temperatura, la humedad relativa fue menor (anómalamente baja) existiendo déficit de humedad en la atmósfera y el suelo derivado de mayor evapotranspiración. En ese año, el estrés hídrico en la vegetación fue severo, como lo muestran las anomalías del NDVI (figura 21c). Los valores más bajos de actividad fotosintética medida con dicho índice se presentaron principalmente en el noroeste y noreste de México. Cuando la sequía meteorológica, las anomalías de temperatura y las de NDVI se combinan (promedio), se obtiene un índice de amenaza climática, que indica en tiempo y espacio los lugares donde la condición climática incrementa el riesgo de incendios (figura 21d). En otras palabras, se identifica las zonas donde solo hace falta incorporar la vulnerabilidad, principalmente relacionada con la actividad humana, para obtener una estimación del riesgo de incendio forestal, en este caso, para abril de 2011, principalmente en el noreste del país.

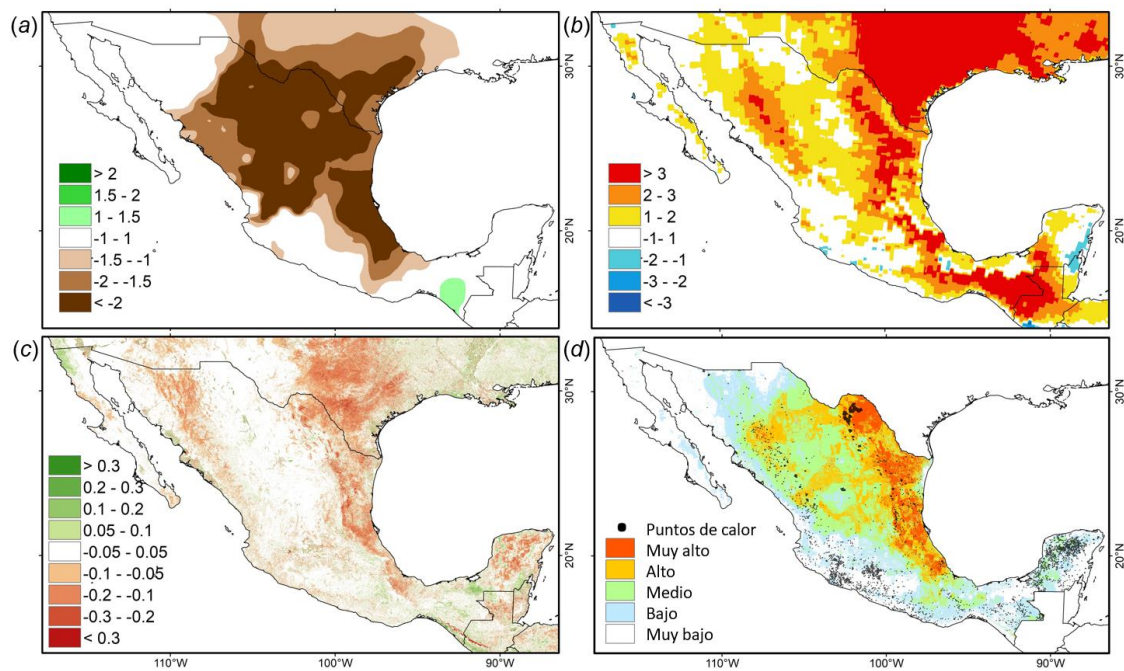


Figura 21. Amenaza climática durante abril de 2011: a) SPI-3, b) anomalía de la temperatura de superficie, c) anomalía del NDVI, d) índice de amenaza climática promedio. Puntos negros (en la figura 21d): incendios detectados por satélite.

Es importante mencionar, que el peligro está definido en términos probabilísticos, para lo cual es necesario estimar la probabilidad de que se presenten condiciones como las de abril de 2011. Para ello, se puede considerar que el SPI proviene de una distribución normal de las lluvias, y por lo mismo, un SPI < -2 tiene una probabilidad de aproximadamente 16%. Por otro lado, a partir de datos de reanálisis o de las mismas estaciones meteorológicas, se puede calcular la probabilidad de que las temperaturas máximas sean anómalamente altas en más de 2°C, al igual que la probabilidad de que el NDVI sea negativo. La probabilidad conjunta de estos factores permite obtener una estimación del peligro climático. Sin embargo, al usar datos observados para calcular el riesgo de incendios para el caso de abril 2011, lo que se plasma en el análisis corresponde a la manifestación del peligro, es decir la amenaza climática.

La mayor severidad de la amenaza climática incluye las áreas que fueron gravemente afectadas por los incendios forestales en el noreste de México (puntos negros en figura 21d). Sin embargo, un análisis más detallado de la

distribución de los puntos de calor muestra que estos eventos también ocurrieron en regiones no afectadas por la sequía, como en la parte centro-oeste de México, lo que demuestra que un modelo de riesgo que solo considera el factor climático como causa de los incendios forestales es incompleto, y tendría un enfoque naturalista del problema. Por ello, es necesario cuantificar los factores que hacen vulnerables a los ecosistemas forestales, y representarlos por medio de indicadores para más adelante incluirlos en un modelo de riesgo de incendios forestales.

En gran parte del sur y centro de México se identifica una mayor vulnerabilidad a incendios forestales, ya que más del 60% de la población está ahí asentada. Las prácticas agrícolas de tala y quema resultan frecuentemente en incendios forestales (Gómez et al., 1993), que son de gran magnitud en años secos, como en la primavera de 1998, cuando el evento de El Niño generó condiciones de alto estrés hídrico en la vegetación (Magaña et al., 1999). La falta de acciones de prevención por parte de autoridades, y las limitadas capacidades para combatir los incendios forestales, hicieron de ese año uno que se recuerda como desastroso en materia ambiental.

Una manera de cuantificar el efecto antrópico que hace vulnerables a los ecosistemas forestales es el HII (figura 22a). Este índice corresponde a la última década, suponiendo que su dinámica es muy lenta y que no varía significativamente de un año a otro. En este sentido, es un modulador de baja frecuencia del riesgo, mientras que la amenaza fluctúa de mes a mes y de un año a otro, y se le considera un factor de riesgo de alta frecuencia.

Además de la influencia humana, la vulnerabilidad de un socioecosistema a condiciones de sequía y altas temperaturas depende de los tipos de vegetación dominantes. Las selvas caducifolias, con alto estrés hídrico en los meses de primavera, son más susceptibles de incendiarse que las selvas perennifolias. Un diagnóstico más detallado ha sido realizado en diversas partes del mundo (ej.

Potencial de peligro de incendios forestales de Estados Unidos; Dillon y Gilbertson, 2020) y en particular para México por parte de la CONABIO (1998). La susceptibilidad de la vegetación al fuego permite clasificarla y asignarle un valor de vulnerabilidad (figura 22b). Por ejemplo, en el oeste de la península de Yucatán, las selvas bajas caducifolias tienden a ser más inflamables (tabla 3) durante la estación seca de marzo a mayo. Al igual que el HII, se considera que los cambios en los tipos de vegetación se dan muy lentamente y por lo mismo, son variaciones de muy baja frecuencia en la vulnerabilidad, por lo que para el presente estudio se ha usado un valor constante.

Finalmente, las políticas de gestión de los ecosistemas naturales en las ANP incluyen acciones de prevención de incendios forestales, en su Plan Operativo Anual. Dichas acciones son en general más profundas que las que desarrolla CONAFOR en el resto del territorio. El cuidado que se tiene en las ANP de la vegetación hace que estas sean en general menos vulnerables que zonas en donde no se mantiene ese monitoreo y prevención de ocurrencia de incendios forestales (figura 22c).

El promedio ponderado de los indicadores normalizados de vulnerabilidad da como resultado un índice de vulnerabilidad consolidado (figura 22d) que muestra áreas de alta vulnerabilidad, principalmente donde el HII es grande. Dicho índice muestra que la vulnerabilidad es mayor donde la exposición (zonas de gran cubierta forestal) es más alta, que corresponde a un patrón espacial de mayor vulnerabilidad en la zona centro sur de México. Sin embargo, debe recordarse que, aunque la vulnerabilidad es menor en el norte del país, el peligro por sequía es mayor y consecuentemente, el riesgo se incrementa en esa zona por causas climáticas relacionadas a la sequía meteorológica.

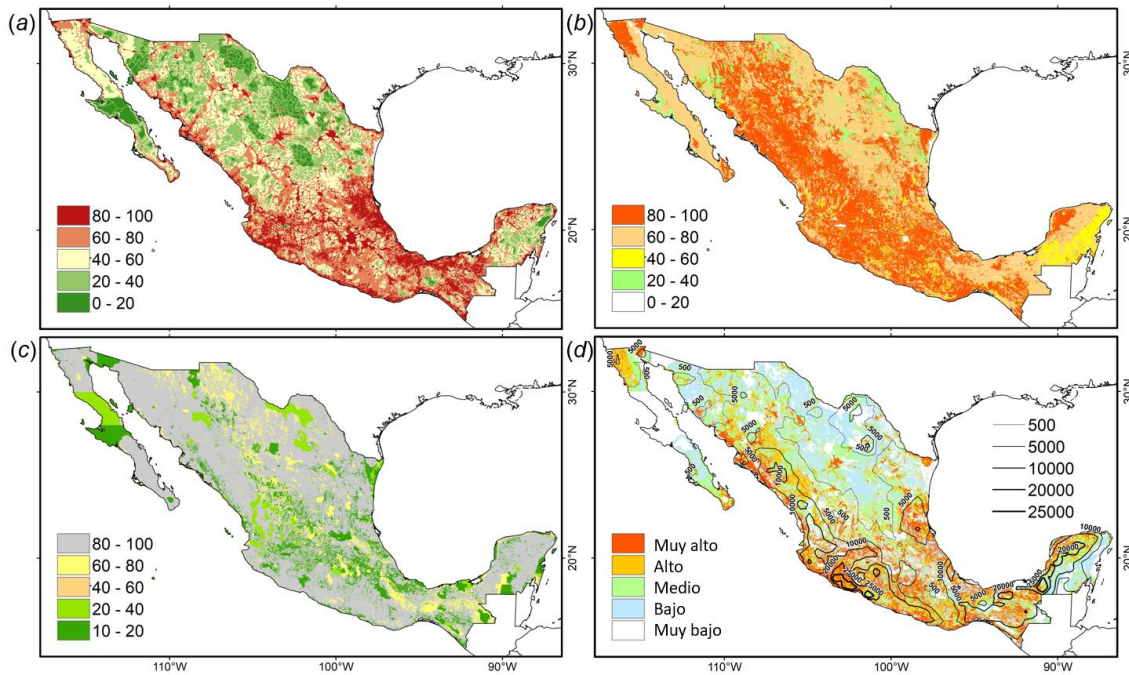


Figura 22. Indicadores de vulnerabilidad: a) a través de la influencia humana, b) susceptibilidad al fuego por tipo de vegetación, c) por áreas naturales protegidas, y d) índice consolidado de vulnerabilidad, las líneas corresponden a los puntos de calor acumulados durante 2001-2015.

La mayor vulnerabilidad de los socioecosistemas ante la sequía se encuentra en las partes meridionales y costeras de México. En la península de Yucatán, por ejemplo, la porción occidental está más afectada por los incendios forestales recurrentes que la parte oriental, ya que las actividades humanas, la susceptibilidad al fuego de la vegetación y la falta de políticas de protección de la selva tropical, contrastan con la baja vulnerabilidad y menos incendios forestales en la parte oriental. En el occidente de la Península de Yucatán, así como la parte central occidental de México (estado de Michoacán), son dos regiones que se ven gravemente afectadas por incendios forestales año tras año, casi independientemente de las condiciones climáticas, como en la primavera de 2011 (figura 21d).

Cuando el índice de amenaza climática se combina con el índice de vulnerabilidad de los socioecosistemas, se obtiene una estimación del riesgo de incendios forestales. En 2011, el número de incendios forestales superó

significativamente el promedio que se registra año tras año (Neri y Magaña, 2016). La mayoría de los puntos de calor se ubicaron en regiones de riesgo climático muy alto y alto, particularmente en la parte norte del estado de Coahuila (figura 23), región del país severamente afectada por incendios forestales durante este evento.

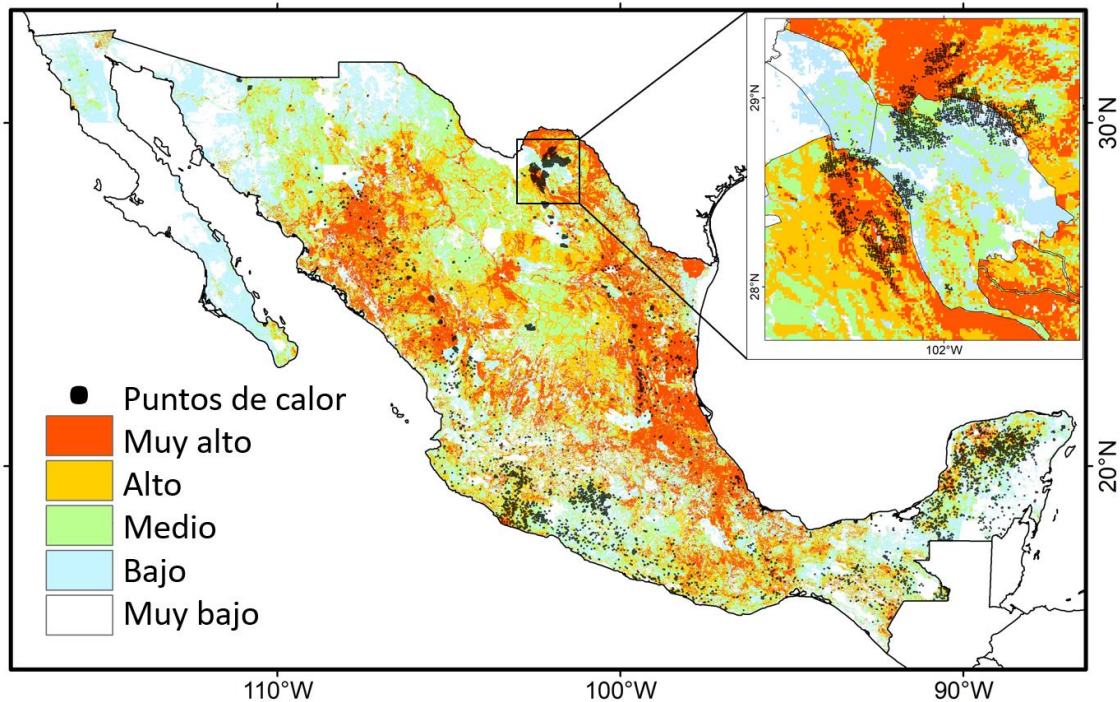


Figura 23. Riesgo de incendios forestales y puntos de calor (puntos negros) observados en abril de 2011. El recuadro corresponde a la parte norte del estado de Coahuila.

Aunque la sequía meteorológica de 2011 y las temperaturas anormalmente altas se presentaron en toda la región noreste de México, hubo lugares en los que los incendios fueron pocos o no se presentaron. Por ejemplo, en las ANP con baja vulnerabilidad, el riesgo fue bajo y no se presentaron incendios, incluso cuando se detectaron algunos incendios dentro de las ANP, estos fueron el resultado de incendios que aparecieron inicialmente en zonas externas de dichas áreas. La evaluación del riesgo de incendios forestales también identifica lugares donde, la falta de medidas de prevención de incendios afecta constantemente a ciertos ecosistemas, como en la Península de Yucatán o el oeste de Michoacán, es decir, la vulnerabilidad muy alta durante el periodo seco normal del año aumenta

el riesgo de incendios forestales identificando niveles críticos. Se debe reconocer que aun en zonas donde el riesgo estimado es bajo o muy bajo, aparecen numerosos incendios forestales. El modelo, por tanto, requiere de información de actividad humana que no fue incluida en el HII original. Por ejemplo, la expansión reciente de zonas para la producción de aguacate en Michoacán ha llevado a que año tras año se presenten numerosos incendios forestales. Lo mismo puede ocurrir en zonas donde otras actividades ilícitas ocurren, como el narcotráfico o la quema con fines de apropiación de tierras. Dichos elementos pueden obtenerse si se da más peso al HII en estas regiones que lo usado en el presente ejemplo. Por ello, es recomendable trabajar esta aproximación por regiones, identificando los factores que inciden en el riesgo de incendios, y caracterizándolos con información disponible.

3.3. Evaluación del modelo de riesgo

Como cualquier modelo, el de la estimación del riesgo de incendios forestales es sólo una aproximación de la realidad y por tanto deben ser evaluado para establecer qué tanto se aproxima a esta. Una forma simple de evaluar el modelo de riesgo se basa en establecer cuántas veces y en dónde concuerda el nivel de riesgo con la magnitud del impacto. Para este fin, se cuentan los puntos de calor localizados en los diferentes rangos de estimaciones de riesgo y se muestra que la mayoría de los incendios forestales (72%) ocurren cuando el riesgo es muy alto, alto y medio (figura 24a). Solo cuando el riesgo es muy bajo, la probabilidad de que ocurra un incendio forestal es baja.

Si la evaluación se hace entre sólo el nivel de amenaza y el número de puntos de calor, la mayor parte de los puntos de calor ocurren en zonas donde la amenaza por sequía es alta y muy alta (44%) (figura 24b). La gran extensión de la sequía meteorológica y las temperaturas anómalamente altas provocan que las zonas con peligro alto y muy alto abarquen gran parte del territorio. Sin

embargo, también se encuentran muchos puntos de calor (40%) en lugares con rango de amenaza bajo y muy bajo, lo cual indica que la parte de actividad humana juega un papel muy importante en la ocurrencia de incendios (figura 24).

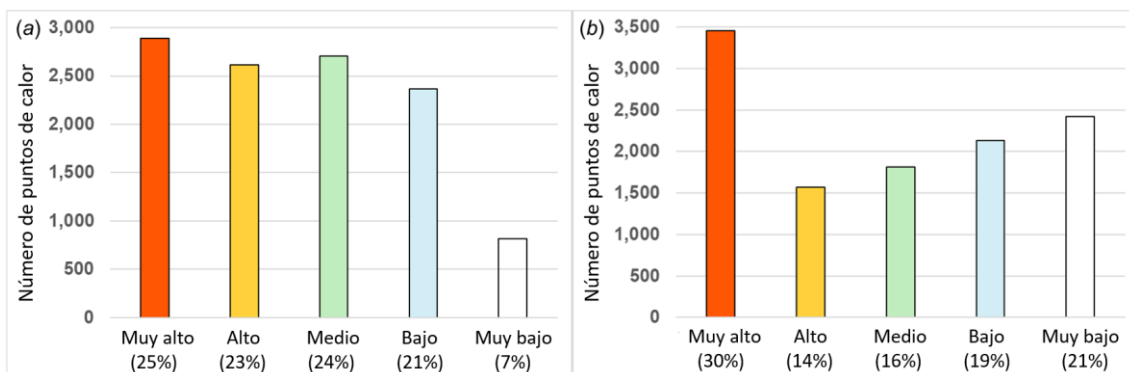


Figura 24. Porcentaje de puntos de calor en: a) rangos de riesgo de incendios forestales, y b) rangos de nivel de peligro climático.

La evaluación muestra que un modelo de riesgo es mejor que sólo considerar un modelo de peligro o amenaza para explicar los incendios forestales. La calidad del modelo de riesgo puede ser mejorado y esto implica que son necesarias modificaciones en los indicadores de vulnerabilidad, así como una aproximación regional, para lograr una mejor descripción de los procesos que resultan en incendios forestales, de forma que eventualmente se pueda incidir en ellos para controlar este tipo de desastres.

3.4. Predicción del riesgo de incendios forestales

Para la gestión del riesgo de desastre existen dos aproximaciones: 1) medidas estructurales, y ii) medidas emergentes. Las primeras implican cambiar de fondo modelos de manejo de un recurso, de aprovechamiento del territorio, de cultura ambiental, etc., es decir, aquellas acciones que se ejecutan aun sin que esté presente la amenaza de una sequía o una condición climática que incremente el

riesgo en un momento dado. Las acciones emergentes por otro lado son de coyuntura, es decir, se ejecutan cuando una amenaza está presente y el impacto es inminente, de no actuarse de manera reactiva el daño puede ser de grandes dimensiones. Para este fin se han diseñado los sistemas de alerta temprana.

Uno de los objetivos de las políticas ambientales en México es reducir la cantidad de incendios forestales. Sin embargo, hasta ahora se ha actuado más en un sentido de respuesta a la emergencia y al desastre (medias emergentes), que en un sentido de prevención. Para este propósito, el uso de información climática es fundamental en la gestión preventiva del riesgo climático. Los pronósticos climáticos, emitidos regularmente por diversas agencias internacionales y las estimaciones de vulnerabilidad pueden combinarse para producir predicciones de riesgo, que lleven a definir las acciones de prevención de forma más eficiente.

La vulnerabilidad explica gran parte de la distribución del mayor número de incendios, como en península de Yucatán. Allí, los pronósticos climáticos no son suficientes para determinar dónde pueden ocurrir los incendios, debido a que con condiciones anómalas de clima o no, estos impactos se presentan de forma cotidiana. Los resultados anteriores sugieren que el monitoreo y el control de la vulnerabilidad son necesarios si se desea reducir la cantidad de incendios forestales. En otras regiones, como el norte de México, las anomalías climáticas durante los episodios de sequía son el elemento clave que inducen niveles de riesgo alto y muy alto.

Para implementar una política de prevención de incendios forestales con un sistema de alerta temprana se requiere una predicción de riesgo con al menos un mes de anticipación. Se presenta un ejemplo en donde se hace uso de un pronóstico climático mensual en combinación con el índice de vulnerabilidad, para proyectar niveles de riesgo de incendio. El ejemplo muestra las ventajas de anticiparse al desastre con estimaciones de riesgo.

La sequía meteorológica de la primavera de 2011 constituye un buen ejemplo de cómo se puede construir la información de riesgo con un enfoque preventivo. El pronóstico climático con un mes de anticipación, como el preparado por el *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (GFDL) en marzo de 2011 (NOAA GFDL 2014; Kirtman et al., 2014), indicó que la sequía meteorológica continuaría durante abril de 2011, principalmente en los estados adyacentes al Golfo de México, con anomalías estandarizadas de precipitación cercanas a -2 (figura 25a). La misma fuente, pronosticó anomalías de temperatura positivas, principalmente en el norte de México (figura 25b). Tales condiciones conducirían a un grave estrés hídrico en la vegetación. Sin embargo, los pronósticos de anomalías de NDVI no estaban disponibles, y el índice de amenaza climática pronosticada se calculó solo con anomalías de precipitación y temperatura. La combinación de estos elementos dio como resultado en el modelo condiciones de amenaza climática en rangos alto y muy alto en el noreste de México, y medio, bajo y muy bajo en el resto del país (figura 25c).

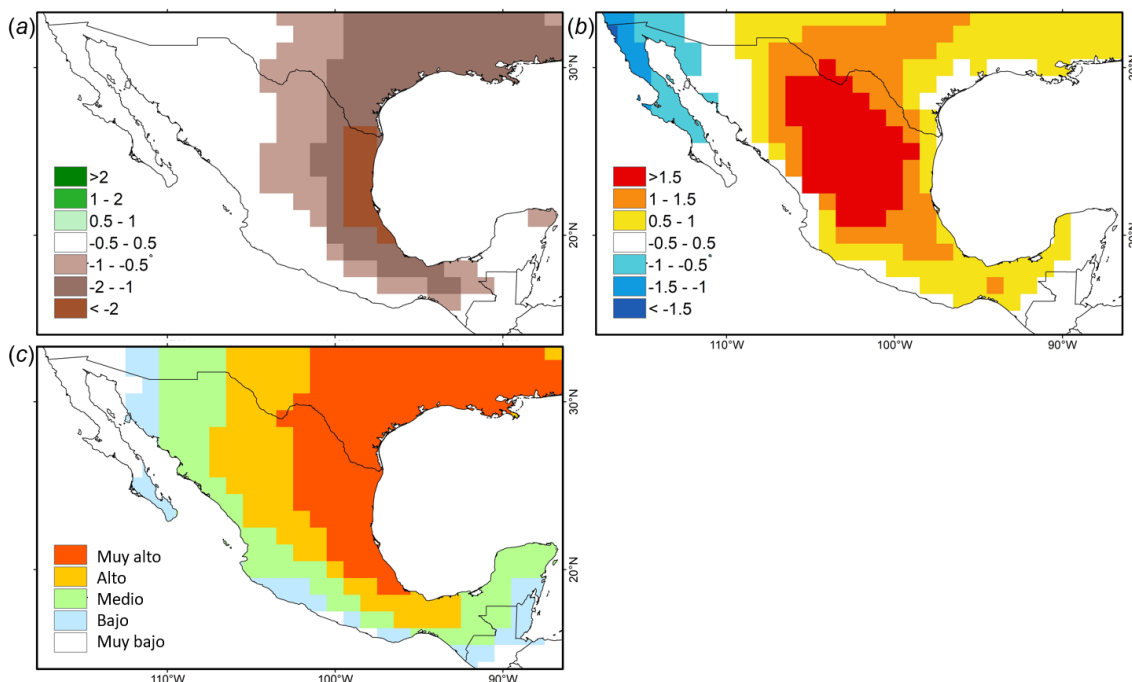


Figura 25. Pronóstico climático para abril elaborado en marzo de 2011. Con base en el modelo GFDL para: a) anomalías de precipitación, b) anomalías de temperatura y c) índice de amenaza climática pronosticada.

Cuando la información sobre la amenaza climática prevista se combina con una estimación reciente de la vulnerabilidad, se obtiene un pronóstico del riesgo de incendio forestal, por ejemplo, con un mes de anticipación (figura 26). El riesgo estimado para abril de 2011 indica que los bosques y selvas que pueden verse afectadas por incendios se localizan en el noreste de México y en los estados del Golfo de México.

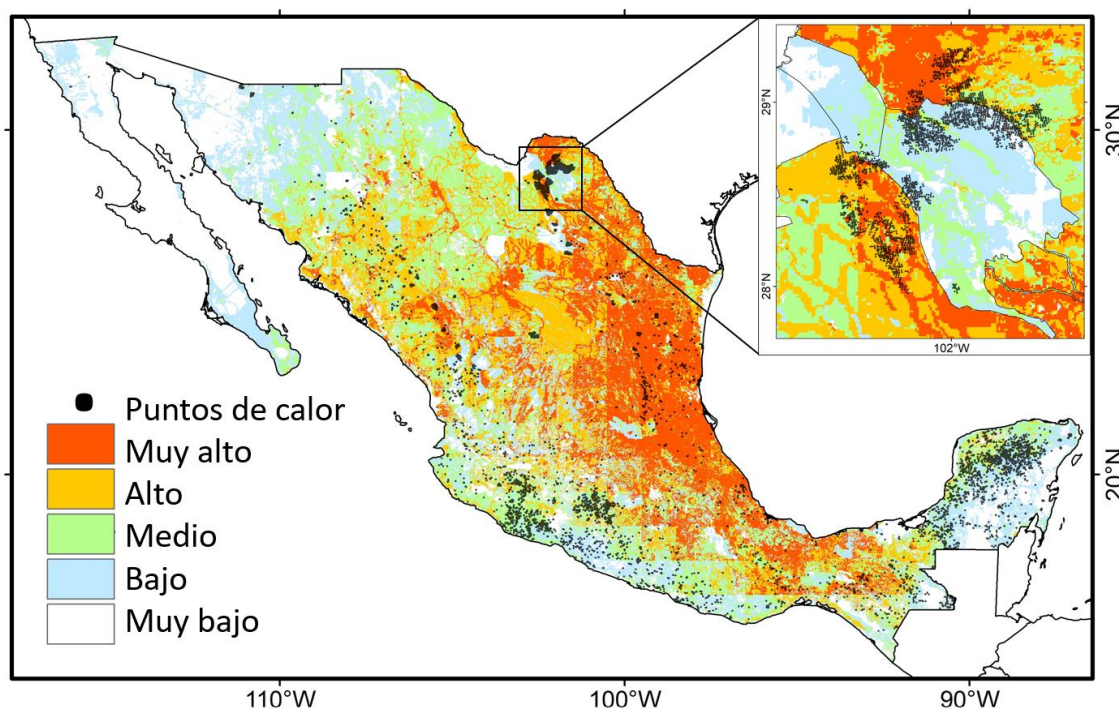


Figura 26. Pronóstico de riesgo de incendio forestal para abril de 2011, con base en el modelo de vulnerabilidad combinado con los datos del GFDL-CM2p1 (condiciones iniciales durante marzo de 2011) y puntos de calor (puntos negros) observados en abril de 2011.

Una comparación del pronóstico de riesgo con los puntos de calor observados en abril de 2011 (figura 26), indica que el modelo de riesgo captura las posibilidades de incendios forestales en el noreste de México, mejor que utilizando solo el pronóstico climático. Sin embargo, en el oeste de la península de Yucatán y en el oeste de Michoacán, donde se predicen niveles de riesgo medios, se observaron numerosos puntos de calor. Estas regiones han sido identificadas como zonas de actividad recurrente e intensa de incendios

forestales principalmente debido a actividades humanas. La capacidad del modelo de riesgo depende más de la vulnerabilidad en dichas regiones.

En el caso descrito aquí, el detalle espacial obtenido en el pronóstico de riesgo es resultado de la alta resolución espacial del diagnóstico de vulnerabilidad. Las proyecciones de riesgo a través de un ensamble de pronósticos permiten establecer la confianza en una predicción dada de peligro crítico a través de probabilidades, de modo que las medidas preventivas puedan focalizarse en términos de las capacidades humanas y económicas disponibles en cada región. Los niveles de riesgo altos pueden ser considerados como el umbral para la implementación de un sistema de alerta temprana de incendios forestales.

Capítulo 4

Discusión y conclusiones

4.1. La gestión del riesgo

Los resultados del estudio muestran que un modelo de riesgo describe en sus dimensiones de tiempo y espacio, la actividad de incendios forestales en México. El uso de información climática sobre condiciones de altas temperaturas, sequía meteorológica y estrés hídrico en la vegetación, en combinación con un diagnóstico detallado de actividades humanas que usan fuego, permite estimar el riesgo de incendios forestales. Es claro que los aspectos de vulnerabilidad implican considerar actividades humanas, las cuales no siguen necesariamente reglas, y por tanto conllevan una importante carga de incertidumbre. A pesar de ello, los ejemplos muestran que la información de riesgo de incendios basada en clima y diagnósticos de vulnerabilidad es más adecuada que basar la planeación o manejo de ecosistemas forestales solo en aspectos relacionados con temperaturas, lluvias o sequía. A pesar de ello, la apuesta sigue siendo reaccionar a la ocurrencia del desastre, sólo combatiendo los incendios conforme se vayan presentando.

En el año 2011, las condiciones de sequía meteorológica en el norte de México y en extensas zonas del centro-sur del país resultaron en un gran número de incendios forestales de gran magnitud. El presente estudio muestra que aun cuando no hay una condición de sequía meteorológica, el uso del fuego y la falta de políticas de prevención de incendios hacen altamente vulnerables a diversas comunidades vegetales y generan riesgo crítico que comúnmente se materializa en grandes desastres. En otras palabras, es necesario monitorear el riesgo climático y no sólo la amenaza climática si se quiere trabajar verdaderamente en la prevención de incendios forestales.

Por la importancia de los servicios ambientales que brindan los bosques, especialmente la captura de carbono y la regulación climática e hídrica, el estudio de los incendios forestales constituye información fundamental en el camino a la construcción de políticas para hacer frente al cambio climático. Sin embargo, los esfuerzos por mostrar que las causas de los incendios forestales están en las actividades humanas, al menos para la mayor parte de México, no han resultado en acciones que reduzcan la causa. Sigue siendo común que las autoridades justifiquen su incremento por condiciones de sequía y/o temperaturas más elevadas con relación al cambio climático, es decir, bajo un enfoque naturalista. Si bien, los efectos negativos de una condición climática adversa aumentan la magnitud del impacto por incendios, se debe reconocer que el factor modulador dado por la actividad humana sigue siendo el principal problema por resolver. Por ello, la gestión de riesgo, en relación con amenazas climáticas debe incluir la conservación de los bosques, considerando a los incendios forestales como uno de los principales problemas ambientales de México. Si se diseñan medidas para mitigar los efectos del cambio climático, estas deben pasar por un verdadero programa encaminado a reducir los incendios forestales eliminando el uso del fuego en diversas actividades humanas dentro y cerca de ecosistemas forestales. Si dicha acción se combina con el uso de información de riesgo climático se habrá avanzado tanto en adaptación como en mitigación del cambio climático.

Aunque ha habido avances en las acciones para detectar y controlar los incendios forestales, todavía hay mucho trabajo por hacer para prevenirlos. Bajo condiciones de sequía meteorológica es común que se presenten incendios forestales altamente destructivos, lo que refleja la falta de acciones preventivas eficientes. Para una adecuada gestión de riesgo se requiere no solo de información climática adecuada sobre el peligro climático, sino también de un completo análisis y manejo de la vulnerabilidad, con una visión integral por medio de modelos, particularmente durante los años secos y calurosos.

Para el caso de los incendios forestales, es posible identificar por medio del análisis climático la probabilidad de que las condiciones atmosféricas que constituyen un peligro y que facilitan la propagación del fuego en una vegetación estresada hídricamente. Plantear estrategias de prevención de incendios forestales manteniendo diversas actividades humanas durante la temporada de secas puede reducir la probabilidad de que un peligro climático resulte en desastre. Sí bien, los modelos de riesgo teóricos aportan al conocimiento, son poco prácticos para su aplicación, debido a que no plantean una metodología objetiva y comúnmente abordan el riesgo de manera general, sin entrar en detalles de las variables involucradas. Los modelos de riesgo cuantitativos como el aquí desarrollado muestran que es posible tener mayor precisión sobre dónde y cuándo puede ocurrir el desastre.

Actualmente dependencias gubernamentales cuentan con alertas de incendios forestales identificando puntos de calor por medio de satélite (ej., CONABIO, CONAFOR). Tal conocimiento no puede considerarse un verdadero esfuerzo para la prevención de incendios debido a que, como ya está presente el desastre, sólo se puede actuar como respuesta a la emergencia y no como prevención. Si bien el monitoreo de puntos de calor es importante para crear estrategias reactivas, el presente estudio propone una metodología encaminada a la construcción de estrategias preventivas, apoyadas en los avances del pronóstico climático. Con ello, se puede pasar de la respuesta a la emergencia a la planificación preventiva (Aron y Patz, 2001). En este contexto existen esfuerzos para dar alertas tempranas de incendio por medio de pronósticos meteorológicos de mediano y largo plazo, que en combinación con información de los factores de vulnerabilidad apoyen el trabajo que a nivel nacional realiza el Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales de México del Sistema Nacional de Información y Gestión Forestal (SNIGF). En la actualidad, la información sobre riesgo de incendios forestales se presenta de manera fragmentada y no se integra a las capacidades de las agencias ambientales como la CONAFOR, posiblemente por la complejidad administrativa que ello conlleva. Así, los productos climáticos que se tienen en la actualidad en México carecen de una

real integración entre la amenaza climática (o meteorológica) y la vulnerabilidad local de los socioecosistemas, que brinde información de riesgo de incendios.

Ante la magnitud de los desastres ambientales recientes, es necesario hacer una reflexión sobre la falta de gestión de riesgo ante condiciones anómalas en el clima en donde no solo se requieran más datos, sino un sistema para hacer uso de ellos, transformarlos en información útil y sean la base para tomar decisiones. Para países como México, con pocos recursos destinados a la ciencia o a la conservación del ambiente, es factible hacer uso de técnicas de teledetección de plataformas libres con las cuales es posible monitorear los ecosistemas. Los datos ambientales obtenidos por satélites no requieren de grandes capacidades de cómputo para poder ser procesados, lo que reduce costos y brinda resultados efectivos. El presente estudio muestra que la combinación de saberes sobre Meteorología, Ecosistemas Forestales, Percepción Remota y Geomática, puede traducirse en productos útiles para la toma de decisiones y la planeación en materia ambiental.

A pesar de que los incendios forestales pueden presentarse en cualquier época del año, se tiene un ciclo anual bien marcado durante los meses de marzo a junio, lo que facilita canalizar los mayores esfuerzos durante este periodo. El monitoreo del riesgo, sin embargo, debe realizarse de forma permanente. La propuesta de este trabajo para la gestión de riesgo va encaminada en el uso de plataformas de libre acceso y su aplicación especialmente en los meses antes y durante el periodo anual de incendios, lo que hace del monitoreo una actividad de bajo costo y alta eficiencia para los encargados de la vigilancia ambiental.

Se debe considerar que gracias a la calidad de los datos y que el bajo costo del monitoreo climático es posible aplicar modelos de riesgo en diversas áreas. Para la gestión de incendios forestales la necesidad radica especialmente en diseñar modelos integrales de riesgo alimentados con la información de clima y actividades humanas que impliquen el uso del fuego, en zonas seleccionada por

su alta vulnerabilidad y su importancia ambiental. Representar y pronosticar la presencia y comportamiento de los incendios forestales con información útil, aunada a esquemas adecuados de comunicación del riesgo llevará a acciones focalizadas de prevención. Caracterizar las actividades humanas que hacen vulnerables a los socioecosistemas es una tarea impostergable tanto en materia de investigación y como en las políticas públicas.

Con la construcción de un modelo que contempla la vulnerabilidad y el riesgo de incendios forestales por medio de métodos objetivos (aproximación de abajo hacia arriba) y la aplicación operacional del monitoreo y pronóstico climático (aproximación de arriba hacia abajo) en conjunto, abre la posibilidad de actuar de forma preventiva ante fenómenos extremos de origen climático, como la sequía, para minimizar los impactos de los desastres socialmente construidos, pero potenciados por fenómenos de origen natural. El uso de dicha información, construida desde un marco de entendimiento integral de procesos (socioecosistema), permite diseñar acciones preventivas o de reducción de riesgo en diversos sectores, como el analizado en el presente estudio.

Uno de los elementos que debe considerarse para aprovechar la información climática es presentar diagnósticos y pronósticos, para la toma de decisiones por sector. La información climática debe ser “hecha a la medida” de las necesidades del usuario. No solo se trata de medir y reportar datos de precipitación o temperatura, sino de preparar información climática de relevancia en el proceso que lleva al impacto en los socioecosistemas, integrada posteriormente en un modelo de riesgo de fácil entendimiento como producto final.

La capacidad para preparar y comunicar información climática útil para la toma de decisiones en el sentido de prevención en el sector ambiental debe aumentar, así como la capacidad de los tomadores de decisiones para comprenderla e integrarla en planeación. Será necesario contar con sistemas que alerten de condiciones climáticas desfavorables en cualquier sector, a partir de escenarios

de riesgo climático estacional. Resulta claro que no se puede decir de qué magnitud será la anomalía climática, ni en qué punto preciso se presentará. Pero la gestión de riesgo tiene como fundamento el principio de la precautoriedad y ante ello se debe comenzar a pasar de acciones de respuesta a la emergencia o al desastre, que tienen un costo extremadamente alto, al de acciones de prevención. Una buena forma de iniciar la adaptación al cambio climático es enfrentar adecuadamente el peligro por anomalías climáticas relacionadas con la variabilidad natural.

Crear capacidades para aprovechar los avances en materia de diagnóstico y pronóstico del clima es una tarea impostergable. La preparación de escenarios de riesgo que permitan reducir los impactos del clima extremo, que se manifiestan en desastres económicos, sociales y ambientales, puede ser el mecanismo de comunicación entre expertos ambientales y tomadores de decisiones. En el mundo, los especialistas en Geografía se han convertido en actores clave para poder preparar, interpretar y comunicar información de relevancia con relación al clima, dado sus conocimientos en aspectos físicos, sociales y económicos de diversos socioecosistemas, así como su habilidad en la interpretación de información generada con sensores remotos y manejo de SIG. Con base en lo anterior, el papel del geógrafo en México, a pesar de estar presente en diversas instituciones gubernamentales aún falta posicionarse en puestos donde pueda ser tomador de decisiones, un reto que debe ser considerado en años venideros.

4.2. Trabajo a futuro

El modelo de riesgo de incendios forestales puede ser mejorado al considerar su construcción por regiones, debido a que en algunas áreas es mayor el peso de las actividades humanas como en el sur del país y en otras, como en el norte de México, es de mayor importancia la sequía. El modelo de riesgo de incendios

regionalizado puede ser construido con base en división natural que contemple la orografía como la propuesta por INEGI en sus Provincias Fisiográficas, debido que los tipos de vegetación siguen en gran medida la configuración topográfica y los pisos altitudinales. La fragmentación del territorio ayudaría a analizar con mayor detalle el peso de las variables involucradas y la posibilidad de agregar algunas otras que sean de importancia a nivel local como las ANP municipales, las cuales no fueron incluidas en el presente estudio.

Las anomalías de NDVI han resultado útiles para evaluar la sequedad de la vegetación, lo que se refleja en una clara relación espaciotemporal entre esta información y los puntos de calor. Monitorear las anomalías de NDVI es clave para las propuestas de caracterizar el peligro, pensando en un alertamiento de incendios forestales periódico en la estación seca y cálida del año. Sin embargo, en el modelo de pronóstico climático no se predicen datos de NDVI. Es posible construirlos a partir de estimaciones de humedad del suelo y esquemas de regionalización como el *Climate Predictability Tool* (CPT) diseñado por el IRI. La clara relación entre déficit hídrico del suelo y NDVI, incluyendo sus desfases, puede ser aprovechada en la construcción de pronósticos de NDVI de alta resolución espacial (Galván, 2011). Así, las condiciones de monitoreo climático pueden estimar el posible comportamiento del NDVI con un mes de anticipación, lo que podría integrarse en los pronósticos de amenaza climática.

El modelo de riesgo de incendios forestales requiere una actualización frecuente (de 2 a 4 años) de los factores de vulnerabilidad. Desafortunadamente, solo se cuenta con un campo del HII o la susceptibilidad de la vegetación al fuego, proporcionada por CONABIO. La actualización de esta información se puede realizar con información de diversas agencias oficiales (SADER, SEDATU, SEMARNAT) con el fin de contar con un HII propio para cada región, y así evaluar el riesgo de incendios forestales en función de la dinámica local de la vulnerabilidad. Construir series temporales de vulnerabilidad, al menos cada tres años, permitirá mejorar el modelo de riesgo como el aquí presentado.

En este estudio se construyó un modelo de riesgo de incendios forestales con base en pronósticos climáticos de temperatura y precipitación con un mes de anticipación para distinguir regiones en alto riesgo, para el caso de la primavera del 2011. Bajo la estrategia de modelación propuesta aquí es posible generar un escenario de riesgo de incendio con base en pronósticos meteorológicos semanales y hasta quincenales considerando su incertidumbre. Cabe aclarar, que, aunque en el presente ejercicio se utilizó sólo un pronóstico, se debe trabajar con ensambles, es decir, tratando de incluir la incertidumbre que conlleva el uso de cualquier pronóstico meteorológico (días) o climático (meses).

Dentro de un sistema de gestión de riesgo, los pronósticos meteorológicos y climáticos deben ser integrados con diversas estrategias de prevención. Las predicciones en modo de ensamble pueden funcionar en paralelo, el de mediano plazo para medir la probabilidad de la amenaza meteorológica con días de anticipación y el segundo para determinar el grado de peligro y riesgo estacional con antelación de uno a tres meses. Una vez construidos los modelos regionales de riesgo de incendio con base en monitoreo (datos observados) y pronóstico, es posible su automatización para la toma de decisiones con base el diagnóstico de vulnerabilidad.

Por último, aun no es claro cuál es el grado de resiliencia de los socioecosistemas después de los daños por incendios forestales. Esto tiene importantes implicaciones cuando se piensa en su conservación, restauración o rehabilitación (CONANP, 2010). Con base en los registros históricos de incendios y el seguimiento del área quemada con el NDVI u otros índices vegetales, es posible identificar la evolución de la vegetación quemada, y para ello se debe considerar que el nuevo crecimiento no sea de plantas invasoras u otro tipo de vegetación, esto puede ser solventado con trabajo de campo, imágenes satelitales de alta resolución o fotografía aérea y/o de drones.

En resumen, el número de incendios forestales en México ha aumentado en las últimas décadas debido a las actividades humanas y la falta de medidas preventivas durante condiciones anormalmente secas. Se reconoce que la capacidad para controlar o mitigar estos desastres ha aumentado, pero los costos ambientales, económicos y sociales de sólo responder a la emergencia son más altos que prevenir. El presente estudio mostró que, utilizando datos de reanálisis climático, monitoreo con índices vegetales en términos de anomalías y actividades humanas para identificar la vulnerabilidad e información sobre incendios forestales históricos, se pueden entender los procesos que resulta en este tipo de desastre ambiental. Esto abre la posibilidad de calcular el riesgo de incendios forestales, y actuar preventivamente, principalmente durante eventos de sequías meteorológicas.

No hay métodos universalmente aceptados para cuantificar la vulnerabilidad, sin embargo, se pueden obtener estimaciones con base en las actividades humanas cerca de los ecosistemas, las características de la vegetación expuesta y las políticas públicas destinadas a prevenir incendios forestales. La vulnerabilidad explica las tendencias y la variabilidad de baja frecuencia (decadal) en el número de incendios forestales, mientras que la información climática modula la variación interanual que puede considerarse de alta frecuencia. La combinación de estos elementos da como resultado un modelo de riesgo que explica mejor los incendios forestales que el enfoque tradicional de proporcionar solo información climática.

Algunas regiones de México experimentan incendios forestales aún más cuando no se observan anomalías climáticas significativas, como en la parte centro-oeste de México o la península de Yucatán. Se ha detectado que estos incendios son inducidos e incluir dicho factor en la vulnerabilidad no es fácil debido a que depende de diversos factores socioeconómicos. La identificación de los factores que dan como resultado la vulnerabilidad es un paso clave en la gestión de riesgos. El esquema actual aquí propuesto para el análisis de riesgo de incendios forestales consiste esencialmente en traducir el diagnóstico cualitativo de los

factores de vulnerabilidad, en cuantificaciones basadas en indicadores que conducen a un índice de vulnerabilidad de los socioecosistemas bajo una sequía meteorológica.

Los resultados indican que el peso dado a la vulnerabilidad debe variar de una región a otra. Debería ser mayor en las regiones donde la actividad de los incendios forestales es grande cada estación seca. En estas regiones, los incendios forestales son principalmente el resultado del uso inapropiado del fuego en actividades agrícolas, las políticas públicas deberían mejorarse para reducir, eliminar o supervisar prácticas como la tala y la quema. Estas políticas (ej., el sistema de alerta temprana) son particularmente relevantes cuando se pronostican condiciones secas en áreas altamente vulnerables. Un pronóstico de riesgo que combina predicciones climáticas y estimaciones de vulnerabilidad permite implementar medidas preventivas con al menos un mes de anticipación en regiones específicas enfocadas durante la época seca y cálida del año (especialmente abril y mayo). Así, el presente análisis sugiere que el papel desempeñado por las anomalías climáticas es más importante en la parte norte de México, mientras que el factor de vulnerabilidad es más relevante en la parte centro-sur.

Un enfoque más preciso para predecir las probabilidades de incendios forestales debería considerar un conjunto de predicciones climáticas y las consecuencias de tales eventos (Finney, 2005). Esto serviría para determinar el nivel de riesgo crítico identificado por medio de umbrales, cuando el riesgo previsto es alto y no hay tiempo para que las medidas estructurales reduzcan la vulnerabilidad. Así, una medida de prevención puede partir de sistemas de alerta temprana. Esto no solo permite la mejora en la capacidad para controlar el fuego en los bosques, sino que también puede ayudar a implementar medidas preventivas de una manera objetiva, en cada temporada.

Uno de los principales desafíos que enfrentarán las regiones tropicales y subtropicales bajo el cambio climático es la prevención de incendios forestales. La identificación de las causas del riesgo abre la posibilidad de implementar medidas de adaptación más eficientes a largo plazo. La gestión adecuada del riesgo climático será crucial en la conservación de los recursos naturales del planeta.

Anexo. Artículo publicado

Galván L. y Magaña V., 2020: Forest fires in Mexico: an approach to estimate fire probabilities. *International Journal of Wildland Fire*. Vol 29(9)

Forest fires in Mexico: an approach to estimate fire probabilities

Luis Galván^{A,C} and Víctor Magaña^B

^APosgrado en Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico City 04510, Mexico.

^BInstituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico City 04510, Mexico.

^CCorresponding author. Email: cohuatl09@gmail.com

Abstract. The probabilities of forest fires in Mexico are estimated using information on precipitation and temperature, along with data on type of vegetation, human activities near forests and fire prevention policies. The proposed model addresses the factors that account for extreme wildfire hazard, and may provide a basis for fire prevention actions, reducing vulnerability factors.

Additional keywords: climate, drought, natural hazard, vulnerability.

Received 11 April 2019, accepted 2 May 2020, published online 3 June 2020

Introduction

Forests provide important ecosystem services, such as climate regulation, recharge of aquifers, food production and greenhouse gas sequestration (e.g. Krieger 2001). For these services to continue, these ecosystems should be conserved or recovered, particularly in areas affected by human activities (Food and Agriculture Organization (FAO) 2014). In many parts of the world, forest fires frequently have negative impacts in the short and long term, because the recovery of the associated ecosystem services may take several years. It is estimated that each year, ~350 million ha of natural areas suffers fire damage around the world (FAO 2007). The resulting CO₂ emissions are almost 50% of those produced by burning fossil fuels (Jolly *et al.* 2015). At times, forest fires may have positive effects in ecosystems (Ressl and Cruz 2012), as maintaining appropriate burning helps to reduce fuel hazard and to maintain the nutrient cycle in pine forests (e.g. Rodríguez-Trejo and Fulé 2003).

In several countries in the tropics, the main cause of forest fires is human activities related to land-use change or agriculture (Nobre and De Simone 2009; Costafreda-Aumedes *et al.* 2017). Various studies have used the term risk of forest fire to refer to the probability of anthropic and natural fires. However, fire effects in a risk analysis should consider the likelihood of a fire burning and the variety of values susceptible to wildland fire (Finney 2005).

Every year numerous forest fires in Mexico are reported, and preventive actions are still insufficient (Zúñiga-Vásquez *et al.* 2017a). Although there has been progress in actions to detect and control forest fires, there is still significant work to be done to prevent human-induced forest fires. Prevention requires appropriate climate information and complete analyses of vulnerability to adverse climatic conditions in order to have better

estimates of fire probabilities, particularly during dry and hot years (Anderson *et al.* 2019). Forest fires in Mexico are estimated to be between 40 and 99% related to human activities (Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) 2001; Pompa-García *et al.* 2018). Meteorological droughts increase the chances of forest fires, as in 1998 and in 2011 (Magaña 1999; Vose *et al.* 2016). During an El Niño year, rainfall may be below normal in the central and southern parts of the country and, at times, this may turn into a severe meteorological drought. In 1997, the rainfall deficit associated with El Niño caused an extreme drought that contributed to a record number of fires in the tropical forests of Mexico during the spring of 1998 (CONAFOR 2009). In 2011, a prolonged extreme drought took place in northern Mexico, and anomalously high temperatures exceeded 40°C for several days during the spring months. Lightning activity in northern Mexico appears to have led to several forest fires that devastated large areas of coniferous forests in the state of Coahuila (Magaña and Nerí 2012; Zúñiga-Vásquez *et al.* 2017b).

The frequency of forest fires in Mexico is partially related to climate anomalies and frequently to human activities that involve the use of fire. The vulnerability of forests to anomalously dry and hot climatic conditions depends, among other things, on the proximity of agricultural activities to forests. It is estimated that agricultural activities induce at least 40% of forest fires in Mexico (CONAFOR 2001), owing to the traditional practice of slash and burn. Intentional burning for agricultural purposes also results in forest fires (Bravo-Espinosa *et al.* 2014), particularly during the dry season or periods of meteorological drought. Vulnerability also depends on accessibility to forest ecosystems, the distance of forests to other human activities (e.g. road traffic), or practices aimed at land-use change (Pérez *et al.*

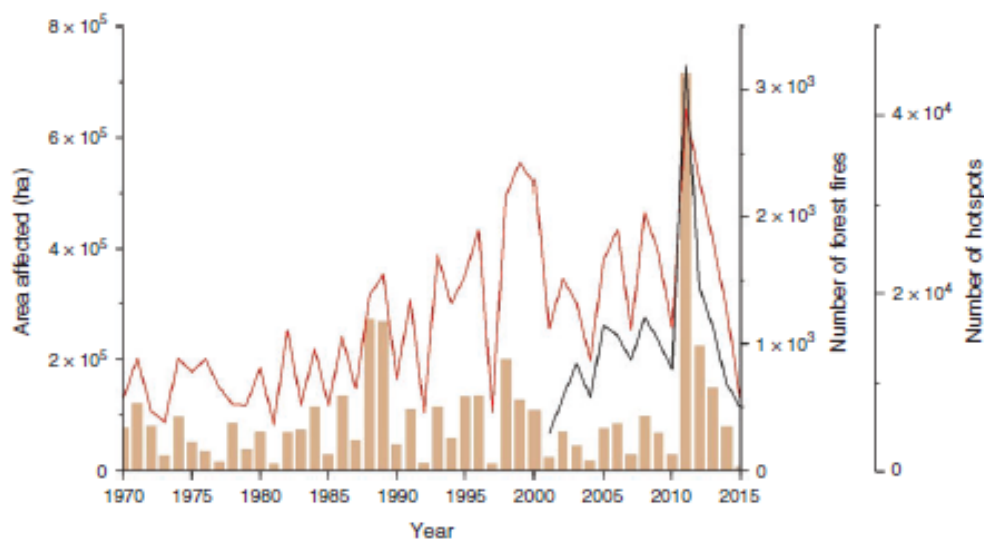


Fig. 1. Annual number of forest fires in Mexico, as reported by the National Forestry Commission of Mexico (CONAFOR) (red line); area affected (ha) by fire (brown bars); and hotspots associated with number of fires, as monitored by FIRMS-NASA (black line).

2013). Consequently, the probabilities of forest fires come from a climatic hazard related to meteorological droughts (precipitation deficit, positive temperature anomalies and hydrologically stressed vegetation), in a vulnerability context, mainly associated with human activities (e.g. agriculture). This approach to estimate climatic risk has been followed in several studies that analyse the potential impacts of climate change (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2012).

In general, climatic risk is given in terms of the probabilities of natural hazard times vulnerability, as an index that reflects social, economic and environmental conditions, and the exposure of the system that may be affected (IPCC 2012; Neri and Magaña 2016). Finney (2005) states that fire risk analysis depends on characterising and combining fire behaviour probabilities and effects, i.e. the consequences. Meteorological droughts are considered one of the most serious climatic hazards that increase forest fire probabilities. McKee *et al.* (1993) determined that moderate drought occurs 9.2% of the time, severe drought 4.4% and extreme drought 2.3% worldwide. Therefore, the probability of a meteorological drought (moderate to extreme), characterised with a Standardised Precipitation Index (SPI-3) less than -1 , is $\sim 16\%$. Actual manifestations of this type of climatic hazard have occurred in 1998 in central southern México, during an El Niño event, and in 2011 in northern Mexico, conditions that are referred to as hazardous events. The chances of positive temperature anomalies are 50%, assuming a normal distribution of the variable. Similarly, the probability for a negative anomaly of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) is 50%, assuming a normal distribution of this variable. Consequently, the joint probability for a natural hazard that may lead to forest fires is of the order of 4%, i.e. a hazardous climatic condition of this kind may approximately occur once every 25 years. However, forest fires in Mexico occur much more frequently than that. This implies that probabilities of forest fires should include the vulnerability of

the natural system, mainly related to human factors (Avila-Flores *et al.* 2010; Pompa-García *et al.* 2018).

In Mexico, response and recovery actions after natural disasters are more common than prevention. The capacity to control forest fires appears to have improved more than the capacity to prevent them. The number of forest fires during the last 45 years has increased at a more rapid rate than affected area (Fig. 1). Dry conditions, like the severe meteorological drought in 2011 in central northern Mexico, are the most important climatic factor that leads to a record area affected by fire. However, forest fires in the central and southern regions appear to depend mostly on human factors (Pompa-García *et al.* 2018).

There is interest within the Mexican government to prevent forest fires, but this effort requires a diagnosis of the factors (natural and human) that induce fires, and risk management strategies through the reduction of vulnerability to drought, for instance. The main objective of the present paper is to develop a method for the quantification of the probabilities of forest fire in Mexico that helps to promote forest fire prevention strategies, identifying the importance of natural and human factors.

Data and methodology

An evaluation of probabilities of forest fire requires characterisation of the climatic conditions and the corresponding physical, economic and social vulnerability factors. Climatic hazards are usually expressed in terms of probability based on historical records. Meteorological drought (i.e. the natural hazard) is a recurrent condition that may be represented in terms of indices, such as the SPI (McKee *et al.* 1993, 1995). This factor serves to describe adverse climatic conditions related to drought. In the present study, the climatic hazard corresponds to a combination of factors, including:

- (i) Three-month SPI-3 data (Chen *et al.* 2002) to describe meteorological drought conditions in $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ grids, for

the 1970–2015 period. Fernandes *et al.* (2011) and Galván (2011) found a strong correlation between SPI-3 and forest fires;

- (ii) Monthly surface maximum temperature anomalies from the North American Regional Reanalysis (NARR 2004), in a $0.3^\circ \times 0.3^\circ$ mesh, for the 1979–2015 period; and
- (iii) Bi-weekly anomalies of the NDVI (Rouse *et al.* 1974), obtained from the US Geological Survey (Huete *et al.* 2002), in 250×250 -m grids, for the 2001–15 period.

To combine hazard data into a single grid, coarse-resolution data were linearly interpolated into a 250×250 -m grid, corresponding to the high spatial resolution of the NDVI data. In each grid cell, SPI-3, temperature anomalies and NDVI data were normalised between 0 and 1 using the relationship:

$$V_r(t) = \frac{\alpha(t) - \min(\alpha)}{\max(\alpha) - \min(\alpha)}$$

where V_r refers to the normalised value of the climate variable, $\alpha(t)$ is a climate variable and $\max(\alpha)$ and $\min(\alpha)$ correspond to its maximum and minimum values. The linear combination of the normalised climate variables results in a climatic hazard index.

Vulnerability may be estimated using information that relates to physical, environmental and socioeconomic factors. In this way, qualitative information is translated into quantitative data of vulnerability using official agencies' data for recent years. The various vulnerability indicators vary in time to reflect the dynamic nature of vulnerability.

According to CONAFOR (2010), the main causes of forest fires are related to the use of fire in agricultural or cattle ranching activities. Vulnerability of natural ecosystems to dry periods also increases from other human activities related to land-use change, illegal forest activities, rights of way, burning of garbage or fire for poaching. These factors can be represented directly or indirectly with data from official sources. For instance, data on the density of the rural population in Mexico and their activities, along with data on built-up areas, roads, railroads, shorelines, land use and cover, and night-time lighting have been used to construct vulnerability indicators. These factors, along with data on the Mexican population, were used to construct a Human Influence Index (HII) (Wildlife Conservation Society Center for International Earth Science Information Network (WCS-CIESIN) 2005). The HII provides information on the direct influence of humans on ecosystems over North America. Its scale ranges from 0 to 100, where 0 represents no human influence and 100 represents maximum human influence.

Regional or local public policies aimed at preventing the occurrence of forest fires are also a key element in the reduction of vulnerability, and therefore, the probability of forest fires. Data on the number of forest fires indicate that in Natural Protected Areas (NPAs), fire prevention practices are more efficient than in the outside rural regions. This makes NPAs less vulnerable to meteorological droughts, which can be represented as an indicator of vulnerability between 0 and 1 (CONAFOR 2012; Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) 2013).

Table 1. Susceptibility of vegetation to fire (source: CONABIO 1998)

Value	Type of vegetation
1	Residual moisture agriculture, seasonal agriculture, semi-deciduous rainforest, irrigation agriculture, low deciduous rainforest
0.9	Natural grassland, pine forest, ayarin forest, high mountain meadow, sabanoide, savanna, subtropical shrubland, scrubland, pine-oak forest, medium-sized deciduous rainforest, coniferous scrub, tascate forest, natural palmar, induced palm grove
0.8	Medium semideciduous rainforest, cultivated grassland
0.7	Halophile vegetation, popal, cattail vegetation, cedar forest, oyamel forest, cultivated forest, gallery forest, tall semi-evergreen forest, hydrophilic halophile vegetation, mangrove, semi-evergreen thorn lowland rainforest, mountain mesophile forest, coastal rosette-like scrubland, lowland evergreen rainforest, tall evergreen rainforest, sarco-crasicaule scrub, induced forest, peten vegetation, rosette-like desert scrub, sarco-crasicaule cloud scrub, deciduous thorn lowland rainforest, coastal dune vegetation, sandy desert vegetation, gallery forest, crasicaule scrubland, oak forest, microfilo desert scrub, oak-pine forest, submontane scrub, sarcocaule scrub
0.6	Medium-sized evergreen rainforest, tropical mesquital, medium-sized semi-evergreen rainforest
0.5	Induced grassland
0.4	Tamaulipas thorny scrub, xerophilous halophilic vegetation, gypsophile grassland, gypsophile vegetation, desert mesquite, mesquite forest, halophilic vegetation, halophilic grassland
0.3	Human settlements
0.2	Aquaculture
0.1	Urban area, without apparent vegetation
0	Water bodies, devoid of vegetation

Various studies have been developed to characterise the sensitivity of vegetation to fire (e.g. Pyrke and Marsden 2005). In Mexico, this type of characterisation of vulnerability based on the susceptibility of forests and rainforests to fire has been developed by the National Commission on Biodiversity (CONABIO 1998). Certain types of vegetation are more likely to catch fire than others (Table 1). These data have been converted into an indicator of vulnerability between 0 and 1.

An index of vulnerability to meteorological drought is constructed by averaging a normalised version (between 0 and 1) of the three indicators listed above. For instance, in northern Coahuila (102°W , 29°N), the human influence index is between 0.2 and 0.3 (low vulnerability), the susceptibility of the vegetation is between 0.6 and 0.8 (high vulnerability), and the protected area condition corresponds to ~ 0.1 (low vulnerability). The average normalised vulnerability index is ~ 0.3 – 0.4 , which corresponds to low vulnerability. The vulnerability index is evaluated in a 250×250 -m grid. It is clear the vulnerability factors are dynamic and should be updated periodically. Using the hazardous event data and vulnerability index, an estimate of the probability of forest fires is obtained to develop a case study for the spring of 2011, when a severe prolonged meteorological drought affected northern Mexico.

A measure of forest fire activity was obtained using hotspots detected by satellite (MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) Collection 6), defined with an 80% or above confidence level. This information was obtained from the National Aeronautics and Space Administration (NASA)-Fire

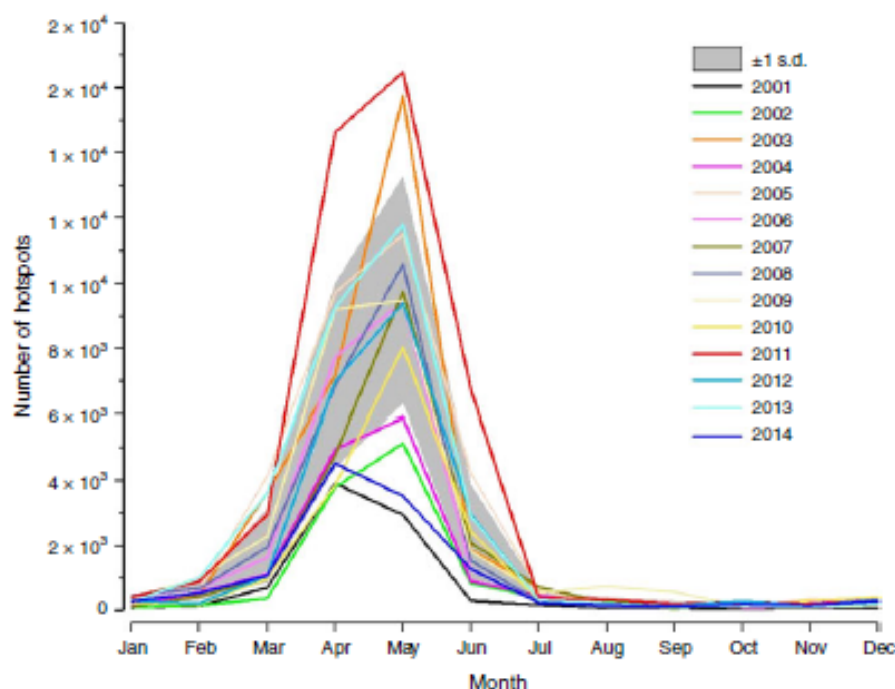


Fig. 2. Number of hotspots of forest fires per month in Mexico between 2001 and 2014. The grey band corresponds to ± 1 s.d. in the number of events detected.

Information for Resource Management System (FIRMS) for the 2001–15 period. The accuracy of the forest fires estimates for the 2011 episode was determined by comparing the ranks of probabilities of forest fires with the density of observed hotspots. The number and location of hotspots were also compared with climate information only to establish the advantage of using vulnerability information for the probabilities of forest fires.

Results

Forest fires in Mexico: temporal behaviour

In Mexico, the number of forest fires shows a maximum during the spring months (April to May) (Fig. 2), i.e. during the period of minimum precipitation, when the highest maximum temperatures are observed (Magaña 1999). After the onset of the rainy season, between June and July, few forest fires are detected. Therefore, most of the analysis focuses on forest fire activity during the first half of the year. The seasonality in forest fires also coincides with the beginning of the spring–summer rain-fed agricultural cycle, when slash and burn practices are common over most of the country.

The years 2003 and 2011 correspond to periods of prolonged (2 to 3 years) and intense ($SPI-3 < -2$) meteorological droughts in northern Mexico. The periods with minimum forest fire activity were related to normal or wet winter–spring conditions, as in 2014. A large number of forest fires may occur even in wet years (e.g. 1986), suggesting the importance of human activity in the occurrence of these events. As the rural population increases, more human activities raise the probability of forest burns (Fig. 3). The rural population has increased approximately at a rate of 0.5% per year, from ~33 million in 1970 to more

58 million in 2015 (World Bank 2017). As there is no clear trend in dry or wet periods in Mexico in recent decades, the tendency for more forest fires may be related to more rural population and human activities. A preliminary (spatially averaged) estimate of probabilities of forest fires may be obtained by combining information on the increase in rural population and the spatial average of SPI-3. In some years, droughts tend to favour a significant increase in the number of fires, particularly in northern México (Pompa-García *et al.* 2018). The correlation between preliminary approximation of the chances of forest fire activity and actual number of fires is 0.85 for northern Mexico, and 0.54 for southern Mexico. In this preliminary approximation, which combines rural population and SPI-3 data (as a precipitation hazard index between 0 and 1), the correlation mostly reflects the coherence in high-frequency variations regulated by climate variability, whereas the positive long-term trend in forest fires appears to be associated with the increase in human activities of the rural population.

Forest fire prevention policies reduce the vulnerability to drought. In NPAs, there are forest fire prevention policies that make these regions less vulnerable during dry and hot conditions (CONANP 2014). These preventive policies include clearing paths in the forests, removal of fuel, and skill creation for the personnel in charge of forest surveillance.

The chances of forest fire may also depend on the type of exposed vegetation, which may determine fire spread.

The previous vulnerability factors may be quantified in terms of indicators that in turn may be averaged into a consolidated vulnerability index. In the present analysis, a larger weight (0.5) was empirically given to the HII, considering it plays a major role in the number of forest fires. Public

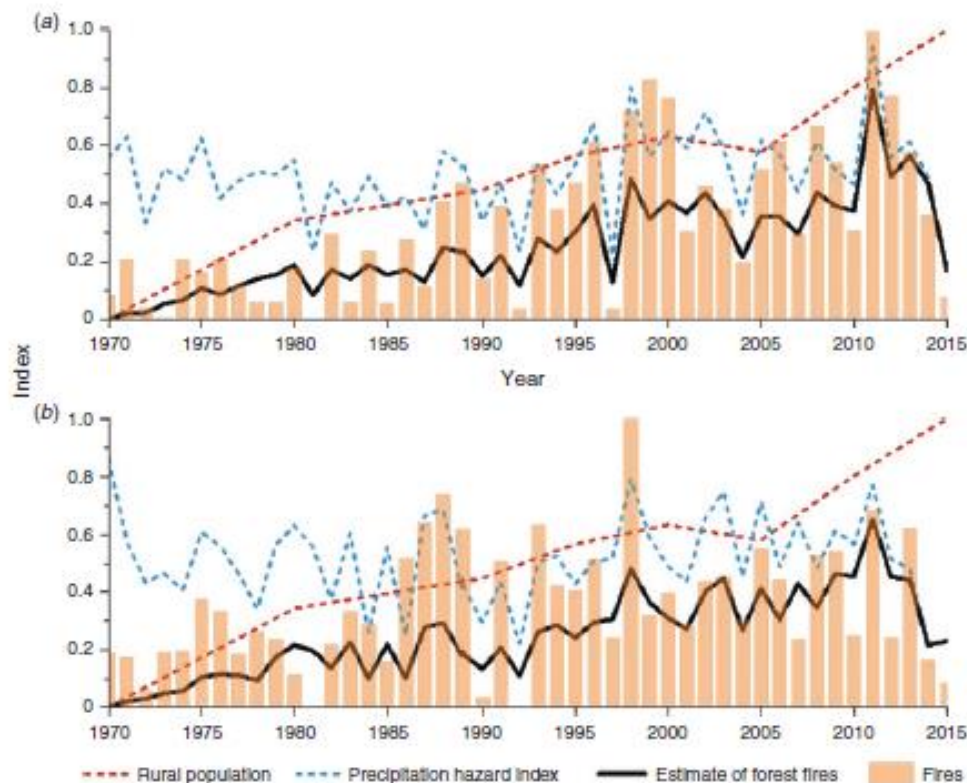


Fig. 3. Time series March–May: a precipitation hazard index obtained from the inverse value of SPI-3 (Standardised Precipitation Index), normalised between 0 (low) and 1 (high) between 1970 and 2015 (blue dashed line) for (a) northern Mexico; (b) southern Mexico. Red dashed line corresponds to the Mexican rural population normalised between 0 and 1; a preliminary estimate of forest fire activity (black solid line); and reported number of fires from CONAFOR (2016) (coral bars).

policies related to the level of protection or ecosystem management, as well as the characteristics of the exposed vegetation, were given a weight of 0.25 each in the averaging process to obtain the vulnerability index. When this index was used in combination with climatic hazardous event data, an estimate of the probabilities of forest fires was obtained. The estimate of forest fires was used to evaluate the specific case of the spring of 2011, a particularly dry year.

Case study: the drought of 2011

The natural hazard

To analyse spatial contrasts in the occurrence of forest fires in Mexico, the conditions during the severe drought of 2011 were analysed. A large area (~300 000 ha) of pastures, forests and rainforests burned, mainly in northern Mexico during that year (Zúñiga-Vásquez *et al.* 2017b). The SPI-3 during April 2011 reached values below -2 , which is considered an extreme drought (Fig. 4a). The maximum temperature anomalies in the northern and central regions of Mexico were between $+2$ and $+3^{\circ}\text{C}$ above average (Fig. 4b). These conditions combined with negative NDVI anomalies that correspond to severe water stress in the vegetation, mostly over north-western and north-eastern Mexico (Fig. 4c). Water stress in the vegetation along the Gulf of Mexico and over the Yucatan peninsula was also large. When these factors were combined into a climate hazard index,

north-eastern Mexico faced an important hazardous event, and the region was at high risk of forest fires (Fig. 4d).

The spatial pattern of the 2011 drought in northern Mexico included areas severely affected by forest fires, but a closer look at the distribution of hotspots shows that these events also occurred in regions not affected by drought, such as the western-central part of Mexico (Fig. 4d).

Vulnerability

The HII is an important factor in the probability of forest fires. In order to determine the origin of recurrent burn activity in some parts of Mexico, this factor should be examined at the regional and local level. Most of southern and central Mexico forests are particularly vulnerable given that more than 60% of the Mexican population is concentrated there (Fig. 5a). Agricultural practices frequently make use of slash and burn (Gómez *et al.* 1993) and further, some fires in recent years have been intentional, in order to expand the areas for avocado production and other crops, particularly in western Mexico (Bravo-Espinosa *et al.* 2014). The type of vegetation is also a factor in vulnerability. For instance, during the dry season from March to May, low deciduous forest tends to be highly flammable (Table 1), as in the western Yucatan Peninsula (Fig. 5b). Finally, ecosystem management policies appear to make NPAs (Fig. 5c) less vulnerable during dry and hot climatic episodes. The

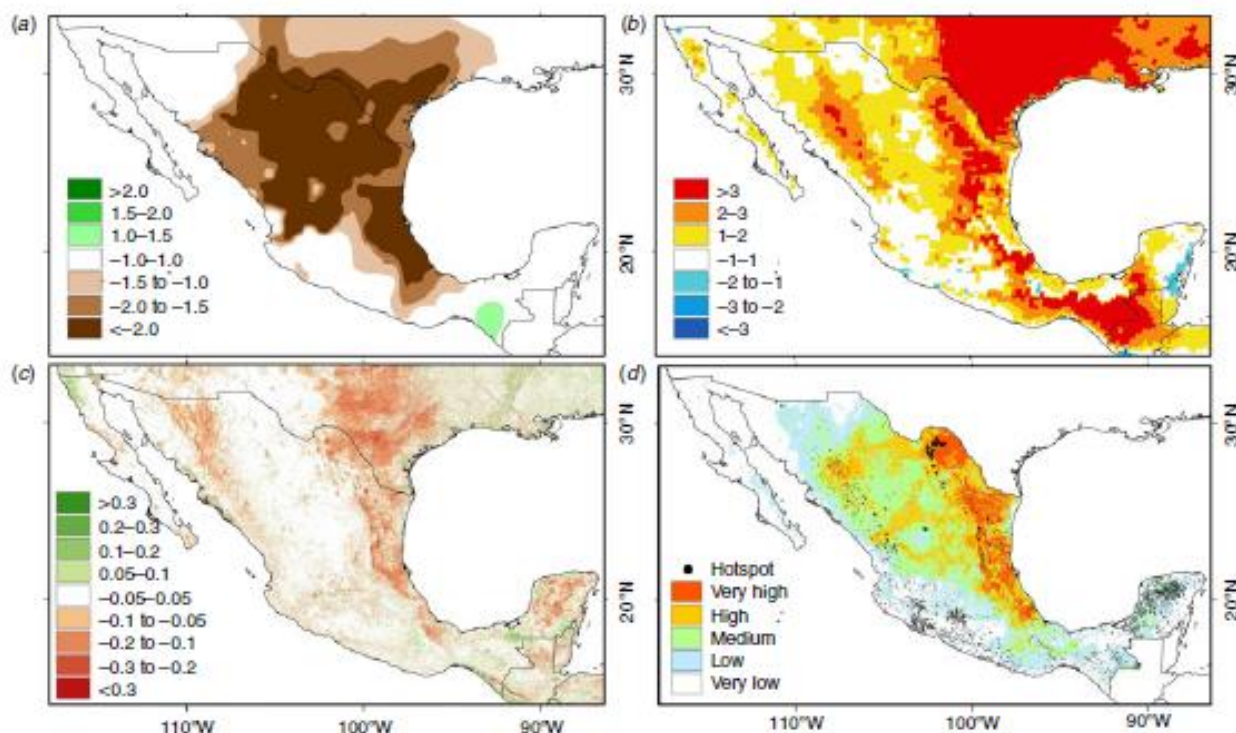


Fig. 4. Climatic hazards during April 2011: (a) SPI-3; (b) surface temperature anomaly ($^{\circ}\text{C}$); (c) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) anomaly; and (d) ranks of the resulting climate hazard index. Black dots indicate fires detected by satellite.

weighted average of the normalised indicators results in a consolidated vulnerability index (Fig. 5d), showing areas of high vulnerability mostly where the HII is large. The regions of high forest fire activity are mainly located in southern and central Mexico, which are in turn areas of high vulnerability.

The highest climatic vulnerability is located in the southern and coastal parts of western Mexico and the Gulf of Mexico. In the Yucatan peninsula for instance, the western part is more vulnerable than the eastern part, corresponding with the type of vegetation and its flammability. The western part of Yucatan, as well as the western-central part of Mexico, are two regions that are severely affected by forest fires year after year, almost independently of climatic conditions (Fig. 5d). When the hazard index was combined with the vulnerability index, an estimate of probabilities of forest fires was obtained, which can be represented in an informal ranking as very high, high, medium, low and very low probabilities.

Probabilities of forest fires in spring 2011

During the spring of 2011, the number of forest fires significantly exceeded the seasonal average (Neri and Magaña 2016), and most hotspots were located in regions of very high and high burn probabilities (Fig. 6). In the northern part of the state of Coahuila, forest fires mainly occurred in regions of very high and high risk, outside NPAs. However, some forest fires were also detected within NPAs with low and very low probability values that resulted from the propagation of fires from neighbouring zones. High and very high forest fire probabilities were observed in some parts of the Yucatan Peninsula or in

western central Mexico, mainly related to high and very high vulnerability. Nevertheless, numerous forest fires occurred in regions of medium, low and very low probability of fire, because the number of induced fires was difficult to estimate.

A simple evaluation of the forest fire (estimate) model was conducted using the number of hotspots in the areas of very low to very high probabilities. Results show that most forest fires (72%) occur when probabilities are very high, high and medium (Fig. 7a). When only climatic hazard information is used, results tend to be less accurate (Fig. 7b). Therefore, the analysis that combines climatic hazards and vulnerability factors is more accurate than the climatic information (hazardous condition for April 2011) to estimate forest fire probabilities. Areas with a low level of fire probability also include a large number of hotspots. This is mainly related to a significant number of fires, of medium and low fire probability ranking, in the western state of Michoacan and in the Yucatan peninsula. In the former, the large number of hotspots reflects a vulnerability level higher than estimated, because intentional burning of natural forests to expand area for avocado orchards (Barsimantov and Antezana 2012; Bravo-Espinosa *et al.* 2014) was not considered. This effect was not well captured by the HII used in the present analysis. In the Yucatan peninsula, a similar tendency to a large number of forest fires exists in relation to forest clearing activities for agricultural and cattle ranching expansion purposes (Cheng *et al.* 2013). The evaluation tends to be more biased towards higher ranks of probability of fire when Michoacan and Yucatan are not included in the evaluation. This implies that the HII should be modified in these regions considering the exacerbated use of fire.

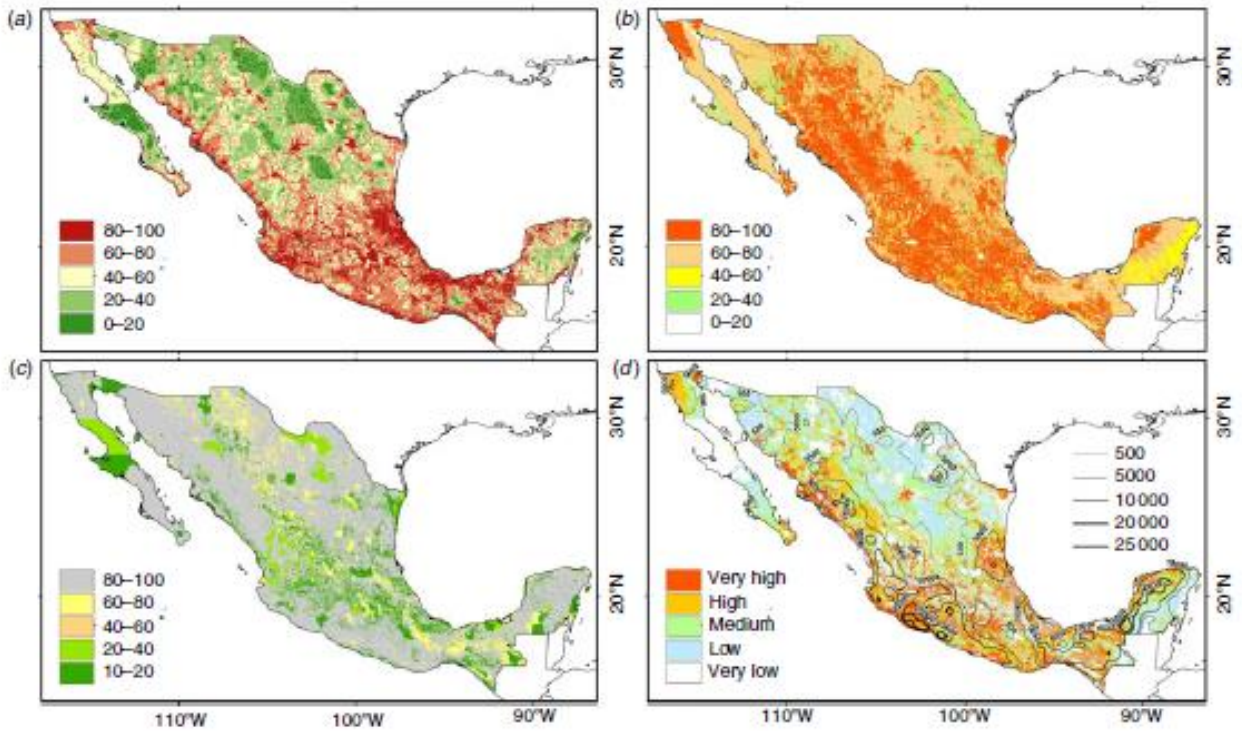


Fig. 5. Vulnerability indicators related to: (a) human influence index (HII); (b) susceptibility to fire by type of vegetation; (c) natural protected areas (NPAs). (d) Consolidated index of vulnerability. As a reference, the number of accumulated hotspots during 2001–15 is presented as black solid lines in (d).

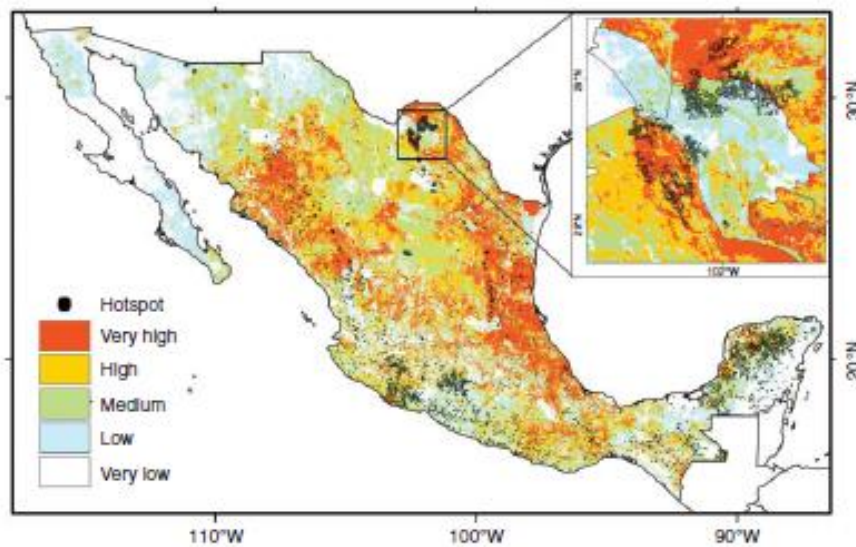


Fig. 6. Informal ranking of the probabilities of forest fires for April 2011. Detected hotspots for the same period are denoted by black dots. The box corresponds to the northern part of Coahuila state, severely affected by forest fires during that period.

Predicting the probabilities of forest fires

One of the goals of environmental policies in Mexico is to reduce the number of forest fires. For this purpose, the use of climate information is important for climate risk management

with preventive actions. Seasonal climate forecasts, regularly issued, and vulnerability estimates may be combined to produce predictions of probabilities of forest fires. For instance, the meteorological drought of spring 2011 constitutes a good

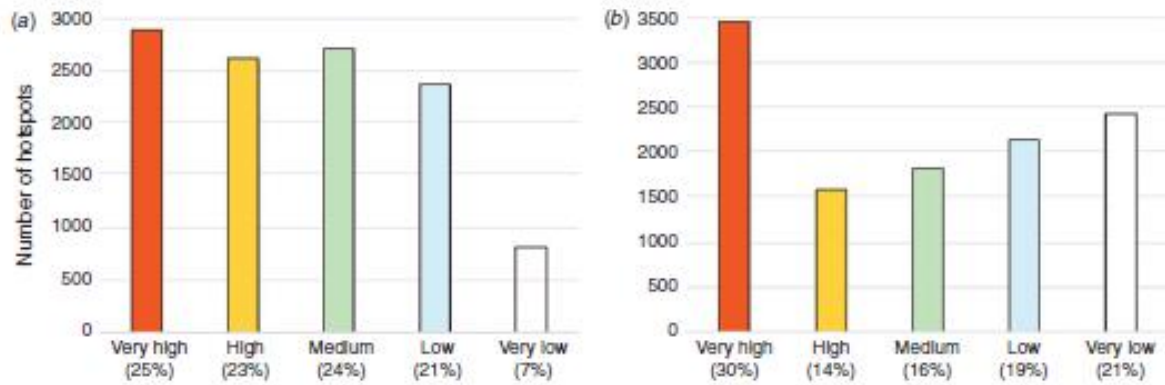


Fig. 7. Percentage of hotspots in (a) the ranks of probabilities of forest fires, and (b) the ranks using climatic information only.

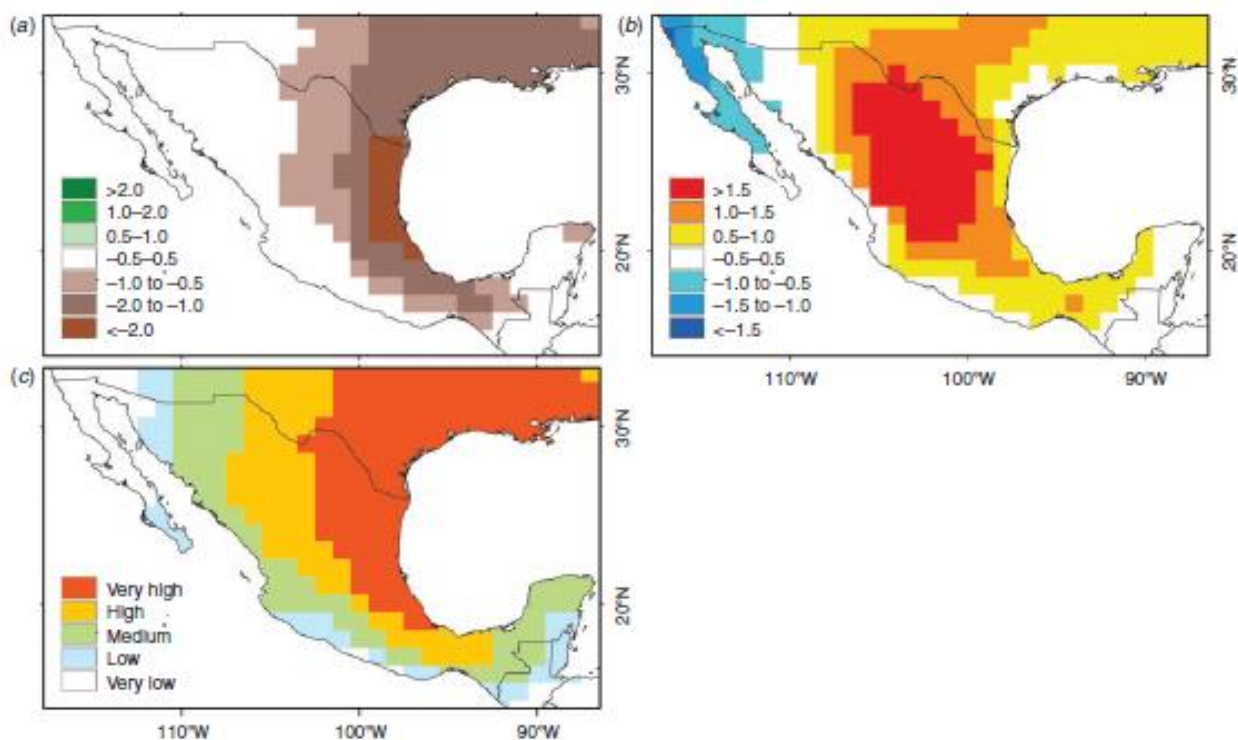


Fig. 8. Climate forecast for April 2011 with initial condition for March 2011 using the Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) model for (a) precipitation anomalies; (b) temperature anomalies; and (c) climatic hazard index.

example on how this type of information may be constructed. The 1-month climate forecast, such as that prepared by the Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) in March 2011 (Kirtman *et al.* 2014; NOAA-GFDL 2014), indicated that the meteorological drought would continue during April 2011, mainly in the states adjacent to the Gulf of Mexico, with precipitation anomalies close to -2 (Fig. 8a). Temperature anomalies between $+1$ and $+1.5^{\circ}\text{C}$ were also predicted, mainly in northern Mexico (Fig. 8b). Such conditions would lead to severe water stress in the vegetation. However, forecasts of NDVI anomalies were not available, so the hazardous event index was calculated with precipitation and temperature

anomalies only. The combination of these elements resulted in high and very high hazardous climatic conditions in north-eastern Mexico, and medium, low and very low climatic hazard in the rest of the country (Fig. 8c).

When the information on the predicted climatic hazard was combined with a recent estimate of vulnerability, a forecast of forest fire probabilities was obtained, for instance, 1 month in advance (Fig. 9). The climate forecast for April 2011 indicated that areas of forests and rainforests in north-eastern Mexico and the Gulf of Mexico states could be affected by fire. A comparison of this forecast with the hotspots observed in April 2011 indicates that forest fire occurrence was approximately

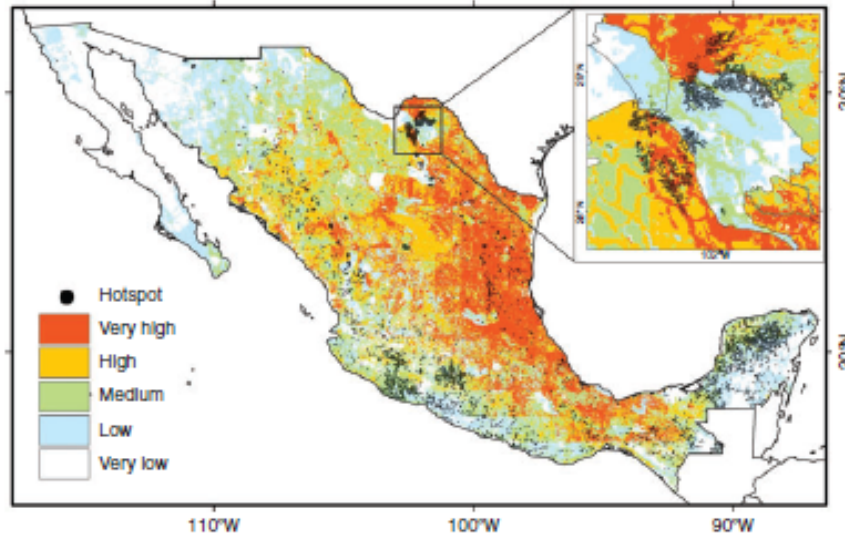


Fig. 9. Forecast of ranking of forest fire probabilities for April 2011 using Geophysical Fluid Dynamics Laboratory GFDL-CM2p1 predictions based on conditions during March 2011.

predicted in north-eastern Mexico in a better way than could have been predicted with the climate forecast only. However, in the western part of the Yucatan peninsula and western central Mexico (Michoacan state), where medium levels of burn probabilities were predicted, numerous hotspots were observed. These regions have been identified as zones of recurrent and intense forest fire activity, well above the rest of the country. This result suggests a more regional analysis should be conducted in these locations, considering that most forest fires are mainly due to negligence or lit on purpose.

Conclusions

The number of forest fires in Mexico has increased in recent decades and their environmental, economic and social costs are significant. The present study estimates the probabilities of forest fires in terms of climatic anomalies and vulnerability conditions mainly related to human activities. There are no universally accepted methods to quantify vulnerability, but it may be estimated based on indicators related to human activities, the characteristics of vegetation and public policies aimed at preventing forest fires. The combination of these factors and hazard data results in a model that better explains probabilities of forest fires than the approach based on climate information only. Vulnerability explains the trends and low-frequency (decadal) variability in the number of forest fires, while climate information modulates the interannual variations.

Some regions of Mexico experience forest fires even when no significant climatic anomalies are observed, as in the western central part of Mexico or the Yucatan peninsula. It has been determined that these fires are intentionally caused to clear forest for agriculture, to remove residual crop biomass and to maintain already modified land (*milpa*, sugarcane and pasture) (Cheng *et al.* 2013). The present analysis suggests that, in terms of the probabilities of forest fires, climate anomalies are more important in the northern part of Mexico, while vulnerability

factors (mainly human activity) are more relevant in the central southern part.

Identification of the factors that result in vulnerability is a key step in risk management. The present analysis scheme consists essentially of translating qualitative diagnosis of vulnerability into quantifications that lead to an index of vulnerability under meteorological drought. Results indicate that the weight given to vulnerability should vary from one region to another. It should be larger in regions where forest fires are intentionally caused by human activities owing to negligence or intentionally during the dry season, as in Michoacan or Yucatan. In these regions, public policies should be improved to reduce or eliminate practices such as slash and burn. Other policies such as an early warning system are particularly relevant when meteorological droughts are predicted in highly vulnerable areas.

Evaluation of the forest fire probability model of the present study requires a recurrent update of vulnerability factors. Unfortunately, the HII factor or vegetation susceptibility to fire is not always easy to evaluate in a yearly manner. Thus, the uncertainty in the predictions of probabilities of forest fires should be examined. Constructing actual time series of vulnerability, at least every 5 years, and then developing an evaluation of the model for a period such as 1980–2015 would improve the model.

A more accurate approach of predicting probabilities of forest fires should consider an ensemble of climate predictions and the consequences of such events (Finney 2005). This would serve to determine the level of critical risk considered as the threshold, for instance, for the implementation of an early warning system.

One of the major challenges that tropical and subtropical regions will face under climate change is the prevention of forest fires. Identification of the causes of such type of events opens the possibility of implementing more efficient adaptation measures in the long term. The adequate management of climatic risk may be crucial in the conservation of the planet's natural resources.

Conflicts of interest

The authors declare no conflicts of interest.

Acknowledgements

This paper was partially supported by CONACYT-INEGI fund 209932 and PAPIIT INI 12717. The first author was financially supported with a CONACYT scholarship. We appreciate the technical assistance of Mr Gustavo Vázquez. Some of the data used for the present study were obtained in collaboration with the Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (LANOT)-UNAM. The technical support of VARICLIM is appreciated. The comments of two anonymous reviewers are highly appreciated.

References

- Anderson LO, Marchezini V, Morello TF, Cunningham C (2019) Modelo conceptual de sistema de alerta e de gestão de riscos associados a incêndios florestais e desafios para políticas públicas no Brasil. *Territorium* **26**, 45–63. doi:10.14195/1647-7723_26-1_4
- Avila-Flores FD, Pompa GM, Antonio NS, Rodríguez TD, Vargas PE, Santillán PJ (2010) Driving factors for forest fire occurrence in Durango state of Mexico: a geospatial perspective. *Chinese Geographical Science* **20**, 491–497. doi:10.1007/S11769-010-0437-X
- Barsimantov J, Antezana NJ (2012) Forest cover change and land tenure change in Mexico's avocado region: is community forestry related to reduced deforestation for high value crops? *Applied Geography* **32**, 844–853. doi:10.1016/J.APGEOG.2011.09.001
- Bravo-Espinosa M, Mendoza ME, Carlon-Allende T, Medina L, Sáenz-Reyes JT, Páez R (2014) Effects of converting forest to avocado orchards on topsoil properties in the Trans-Mexican volcanic system, Mexico. *Land Degradation & Development* **25**, 452–467. doi:10.1002/LDR.2163
- Chen M, Xie P, Janowiak JE, Arkin PA (2002) Global land precipitation: a 50-yr monthly analysis based on gauge observations. *Journal of Hydro-meteorology* **3**, 249–266. doi:10.1175/1525-7541(2002)003<0249:GLPAYM>2.0.CO;2
- Cheng D, Rogan J, Schneider L, Cochrane M (2013) Evaluating MODIS active fire products in subtropical Yucatán forest. *Remote Sensing Letters* **4**, 455–464. doi:10.1080/2150704X.2012.749360
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) (2013) Áreas Naturales Protegidas Federales de México. Available at <http://sig.conanp.gob.mx/website/interactivo/anps/> [Verified 16 May 2020]
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) (2014) Programa Nacional de Áreas Naturales Protegidas 2014–2018. Plan Nacional de Desarrollo 2013–2018. Gobierno de la República. México. Available at <https://www.conanp.gob.mx/documentos/PNANP20142018.pdf> [Verified 16 May 2020]
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (2001) Programa estratégico forestal para México 2025. Publicación Especial de la Comisión Nacional Forestal. (Zapopan, Jalisco, México).
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (2009) 'Programa Nacional de Protección contra Incendios Forestales. Resultados 2008. Primera edición.' (Zapopan, Jalisco, México).
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (2010) Incendios forestales. Guía práctica para comunicadores. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (Zapopan, Jalisco, México).
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (2012) Zonificación forestal. Available at <https://snigf.cnf.gob.mx/zonificacion-forestal/> [Verified 16 May 2020]
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (2016) Reporte semanal de resultados de incendios forestales 2016. Programa Nacional de Prevención de Incendios Forestales/Centro Nacional de Control de Incendios Forestales-CONAFOR. (Zapopan, Jalisco, México).
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (1998) Los incendios en México: un diagnóstico de su efecto en la diversidad biológica. Informe entregado a la SEMARNAT. Available at <http://conabio.gob.mx/mapaservidor/incendios/modis/tablas2007/tablas2007/vegetacion.html> [Verified 16 May 2020]
- Costafreda-Aumedes AS, Comas C, Vega GC (2017) Human-caused fire occurrence modelling in perspective: a review. *International Journal of Wildland Fire* **26**, 983–998. doi:10.1071/WF17026
- Fernandes K, Baethgen W, Bernardes S, DeFries R, DeWitt DG, Goddard L, Lavado W, Dong EL, Padoch C, Pinedo VM, Uriarte M (2011) North tropical Atlantic influence on western Amazon fire season variability. *Geophysical Research Letters* **38**, L12701. doi:10.1029/2011GL047392
- Finney M (2005) The challenge of quantitative risk analysis for wildland fire. *Forest Ecology and Management* **211**, 97–108. doi:10.1016/J.FORECO.2005.02.010
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2007) 'Situación de los bosques del Mundo.' (FAO: Rome, Italy).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2014) 'El estado de los bosques del mundo. Potenciar los beneficios socioeconómicos de los bosques.' (FAO: Rome, Italy).
- Galván OL (2011) Impacto de la sequía meteorológica en la vegetación en distintas regiones climáticas de México (1982–2006). Masters thesis, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Mexico City. Available at 132.248.9.195/ptb2011/octubre/0674287/Index.html [Verified 16 May 2020]
- Gómez PA, Kaus A, Jimenez OJ, Bainbridge D, Rorive VM (1993) Mexico. In 'Sustainable agriculture and the environment in the humid tropics'. (Eds BJ Rice, JL Overton) pp. 483–548. (The National Academies Press: Washington, DC)
- Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez EP, Gao X, Ferreira LG (2002) Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* **83**, 195–213. doi:10.1016/S0034-4257(02)00096-2
- IPCC (2012) 'Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation.' A special report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (Eds CB Field, V Barros, TF Stocker, D Qin, DJ Dokken, KL Ebi, MD Mastrandrea, KJ Mach, GK Plattner, SK Allen, M Tignor, PM Midgley). (Cambridge University Press: Cambridge, UK).
- Jolly WM, Cochrane MA, Freeborn PH, Holden ZA, Brown TJ, Williamson GJ, Bowman DM (2015) Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nature Communications* **6**, 7537. doi:10.1038/NCOMM58537
- Kirtman BP, Dughong M, Johna MI (2014) The North American Multimodel Ensemble: Phase-1 seasonal-to-interannual prediction; Phase-2 toward developing intraseasonal prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society* **95**, 585–601. doi:10.1175/BAMS-D-12-00050.1
- Krieger DJ (2001) The economic value of forest ecosystem services: a review. The Wilderness Society, Washington DC. Available at <https://www.sierraforestlegacy.org/Resources/Conservation/FireForestEcology/ForestEconomics/EcosystemServices.pdf> [Verified 18 May 2020]
- Magaña RV (Ed.) (1999) 'Los impactos de El Niño en México.' (Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Gobernación: Mexico City). Available at <http://centro.paot.org.mx/index.php/porinstituciones/otros-organismos/73-varios/745-los-impactos-de-el-nino-en-mexico> [Verified 18 May 2020]
- Magaña RV, Neri C (2012) El reto de la sequía en México. *Revista Mexicana de Sociología* **1**, 12–14.
- McKee TB, Doesken NJ, Kleist J (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. In 'Eighth conference on applied climatology', 17–22 January 1993, Anaheim, CA. (American Meteorological Society: Boston, MA, USA).
- McKee TB, Doesken NJ, Kleist J (1995) Drought monitoring with multiple time scales. In 'Proceedings of the ninth conference on applied

- climatology', 15–20 January 1995, Dallas, TX. (American Meteorological Society: Boston, MA, USA).
- NASA Fire Information for Resource Management (FIRMS) Active fire data: MODIS Collection 6 NRT – MODIS Collection 6 NRT Hotspot/Active Fire Detections MCD14DL. Available at <https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/firms> [Verified 18 May 2020]
- Neri C, Magaña RV (2016) Estimation of vulnerability and risk to meteorological drought in Mexico. *Weather, Climate, and Society* **8**, 95–110. doi:10.1175/WCAS-D-15-0005.1
- NOAA-GFDL (2014) GFDL-CM2p1 model output prepared for CMIP5, served by ESGF. World Data Center for Climate (WDCC) at Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ), Hamburg Germany. Available at <https://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/cerasearch/entry?acronym=NGG2> [Verified 18 May 2020]
- Nobre CA, De Simone BL (2009) 'Tipping points' for the Amazon forest. *Current Opinion in Environmental Sustainability* **1**, 28–36. doi:10.1016/J.COSUST.2009.07.003
- North American Regional Reanalysis (NARR) (2004) A long-term, consistent, high-resolution climate dataset for the North American domain, as a major improvement upon the earlier global reanalysis datasets in both resolution and accuracy. Fedor Mesinger et al. [BAMS]. Available at <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.narr.html> [Verified 20 May 2020]
- Pérez VG, Márquez LM, Cortés OA, Salmerón MM (2013) Análisis espacio-temporal de la ocurrencia de incendios forestales en Durango, México. *Madera y Bosques* **19**, 37–58. doi:10.21829/MYB.2013.192339
- Pompa-García GM, Camarero JJ, Rodríguez-Trejo DA, Vega-Nieva DJ (2018) Drought and spatiotemporal variability of forest fires across Mexico. *Chinese Geographical Science* **28**, 25–37. doi:10.1007/S11769-017-0928-0
- Pyrke AF, Marsden SJB (2005) Fire-attributes categories, fire sensitivity, and flammability of Tasmanian vegetation communities. *Tasforests* **16**, 35–46.
- Ressl R, Cruz I (2012) Detección y monitoreo de incendios forestales mediante imágenes de satélite. *Biodiversitas* **100**, 12–13.
- Rodríguez-Trejo DA, Fulé PZ (2003) Fire ecology of Mexican pines and a fire management proposal. *International Journal of Wildland Fire* **12**, 23–37. doi:10.1071/WF02040
- Rouse JW, Haas RH, Schell JA, Deering DW (1974) Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In 'Proceedings, third earth resources technology satellite-1 symposium', 10–14 December 1973, Washington DC. (Eds CF Stanley, PM Errico, AB Margaret) pp. 309–317. (Scientific and Technical Information Office, National Aeronautics and Space Administration: Washington DC). Available at <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19740022614.pdf> [Verified 18 May 2020].
- Vose JM, Clark JS, Luce CH, Patel-Weyand T (Eds) (2016) Effects of drought on forests and rangelands in the United States: a comprehensive science synthesis. USDA Forest Service, General Technical Report WO-93b. (Washington, DC, USA). doi:10.2737/WO-GTR-93B
- Wildlife Conservation Society Center for International Earth Science Information Network (WCS-CIESIN) (2005) Last of the wild Project, version 2, 2005 (LWP-2): Global Human Influence Index (HII) dataset (geographic). Available at <http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/wildareas-v2-human-influence-index-geographic> [Verified 18 May 2020]
- World Bank (2017) World development indicators. (Washington, DC, USA). Available at <http://data.worldbank.org/data-catalog/world-development-indicators> [Verified 18 May 2020]
- Zúñiga-Vásquez VJM, Cisneros GD, Pompa GM, Rodríguez TDA, Pérez VG (2017a) Spatial modeling of forest fires in Mexico: an integration of two data sources. *Bosque* **38**, 563–574. doi:10.4067/S0717-92002017000300014
- Zúñiga-Vásquez VJM, Cisneros GD, Pompa GM (2017b) Drought regulates the burned forest areas in Mexico: the case of 2011, a record year. *Geocarto International* **34**, 1–14. doi:10.1080/10106049.2017.1415986

Referencias

- Agee J. K., 1998: The landscape ecology of western fire regimes. *Northwest Sci.* 72, 24-34.
- Anderson L. O., Marchezini V., Morello T.F. y Cunningham C., 2019: Modelo conceitual de sistema de alerta e de gestão de riscos e desastres associados a incêndios florestais e desafios para políticas públicas no Brasil. *Territorium* 26, 45–63.
- Aron J. L. y Patz J. A., (editores) 2001: *Ecosystem Change and Public Health: A Global Perspective*, 504p. The Johns Hopkins University Press, Baltimore, MD.
- Aragão, L. E. O., Malhi, Y., Barbier, N., Lima, A., Shimabukuro, Y., Anderson, L., y Saatchi, S., 2008: Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1498), 1779–1785.
- Ávila F. D., Pompa G. M., Antonio N. S., Rodríguez T. D., Vargas-P. E. y Santillán P. J., 2010: Driving factors for forest fire occurrence in Durango State of Mexico: A geospatial perspective. *Chinese Geographical Science* 20(6):491-497.
- Balvanera P., 2012: Los servicios ecosistémicos que ofrecen los bosques tropicales. *Ecosistemas* 21 (1-2): 136-147.
- Banco Mundial, 2017: *World Development Indicators*. Washington, D.C.: The World Bank (producer and distributor). <http://data.worldbank.org/data-catalog/world-development-indicators>
- Bar M. A., Syphard A. D., Stewart S. I. y Radeloff V. C., 2012: Wildfire ignition-distribution modelling: a comparative study in the Huron-Manistee National Forest, Michigan, USA. *International Journal of Wildland Fire*.

- Barbat A. H., 2003: Detailed application of the holistic approach for seismic risk evaluation in an urban center using relative indices. Execution of component II. Indicators for Disaster Risk Management. Inter-American Development Bank. Colombia.
- Berkes, F., J. Colding y Folke C. (editores), 2003: Navigating social-ecological systems: building resilience for complexity and change. Cambridge, Cambridge University Press. 393 pp.
- Broad, Pfaff y Glantz, 2002: Effective and equitable dissemination of seasonal to Interannual climate forecasts: Policy implications from the Peruvian fishery during El Niño 97-98. *Climate Change* Vol. 54: pp. 415-438.
- Carreón A. G., Gómez A., Chávez C., Austria Y., Corzo M. y Sepúlveda C., 2006: Percepción social del manejo y prevención de incendios forestales, en seis comunidades de la Selva Lacandona, Chiapas, México. Informe Técnico Final. NATURALIA. Conservation International. PARKSWATCH. México. 43 p.
- Cecil D.J., Buechler D. y Blakeslee R., 2014: LIS/OTD Gridded Lightning Climatology Data Sets. En NASA EOSDIS Global Hydrology Resource Center Distributed Active Archive Center Huntsville, Alabama, U.S.A. Datos disponibles en [<ftp://ghrc.nsstc.nasa.gov/pub/lis/climatology>].
- Chen, M., Xie P., Janowiak J. E. y Arkin P. A., 2002: Global Land Precipitation: A 50-yr Monthly Analysis Based on Gauge Observations, *J. of Hydrometeorology*, 3, 249-266
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), 1970-2015: Estadística final del reporte semanal de incendios forestales. Programa Nacional de Prevención de Incendios Forestales, CENCIF. Coordinación General de Conservación y Restauración Gerencia de Manejo del Fuego.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), 2001: Programa Estratégico Forestal para México 2025. Publicación Especial de la Comisión Nacional Forestal, Zapopan, Jalisco, México.

- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), 2009: Programa Nacional de Protección contra Incendios Forestales. Resultados 2008. Primera edición.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), 2010: Incendios forestales. Guía práctica para comunicadores. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), 2012: Zonificación Forestal. Disponible en: https://snigf.cnf.gob.mx/?page_id=50099
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2022: Perspectiva Meteorológica para Incendios Forestales. No. Aviso: 37. Servicio Meteorológico Nacional. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/incendios-forestales-diario>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), 2010: Estrategia de Cambio Climático para Áreas Protegidas. Semarnat. México.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), 2013a: Áreas Naturales Protegidas Federales de México. Disponible en: <http://sig.conanp.gob.mx/website/interactivo/anps/>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), 2013b: SEDUE. 1988. Ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente. Secretaria de desarrollo urbano y ecología. Diario oficial de la federación (DOF).
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), 2014: Programa Nacional de Áreas Naturales Protegidas 2014-2018. Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018. Gobierno de la República. México. 152 pp
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), 1998: Los incendios en México: un diagnóstico de su efecto en la diversidad biológica. Informe entregado a la SEMARNAT. Sin publicar <http://conabio.gob.mx/mapaservidor/incendios/modis/tablas2007/tablas2007/vegetacion.html>

- Costafreda A. S., Comas C. y Vega G. C., 2017: Human-caused fire occurrence modelling in perspective: a review. *International Journal of Wildland Fire*, 26, 983–998.
- Dillon G. K. y Gilbertson-Day J. W., 2020: *Wildfire Hazard Potential for the United States (270-m)*, version 2020. 3rd Edition. Fort Collins, CO: Forest Service Research Data Archive.
- Elms D.G., 1992: Risk assessment. En: *Engineering safety*. Editado por David Blockley. McGraw-Hill Book Co.
- Estado de Tlaxcala, 2013: Programa de Incendios Forestales. Gobierno del estado 2011-2016. Protección Civil. 32pag.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI), (n.d. a). Why use GIS 2013. Disponible en: <http://www.gis.com/content/why-use-gis>
- Fernandes K., Baethgen W., Bernardes S., DeFries R., DeWitt D., Goddard L., Lavado W., Lee D., Padoch Ch., Pinedo M. y Uriarte M., 2011: North Tropical Atlantic influence on western Amazon fire season variability. *Geophysical Research Letters*, vol. 38, L12701.
- Finney M., 2005: The challenge of quantitative risk analysis for wildland fire. *Forest Ecology and Management*. 211, 97–108.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2007: *Situación de los bosques del Mundo*. Roma.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2014: *El estado de los bosques del mundo. Potenciar los beneficios socioeconómicos de los bosques*. Roma.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2020: *Estudio de tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina al año 2020 Informe Nacional México*.
- Folke C., Chapin F. S. y Olson, P., 2009: Transformations in Ecosystem Stewardship. En: Chapin F. S, Kofinas G. P. y Folke C., (eds.). *Principles of Ecosystem Stewardship. Resilience-Based Natural Resource*

Management in a Changing World. Springer Science+Business Media. Pp. 103-125.

Galindo I., Barrón J. y Padilla, J. I., 2009: Relación entre ganadería extensiva e incendios en zonas forestales del estado de Colima. *Revista de investigación y difusión científica agropecuaria*. 13(3), 17-33.

Galván O. L., 2011: Impacto de la sequía meteorológica en la vegetación en distintas regiones climáticas de México (1982-2006). Tesis de Maestría en Geografía, UNAM.

García A. V., 2006: Estrategias adaptativas y amenazas climáticas. En: Urbina S. J. y Martínez F. J. (compiladores), *Más allá del cambio climático. Las dimensiones psicosociales del cambio ambiental global*.

Gellert-de Pinto, G. I., 2012: El cambio de paradigma: de la atención de desastres a la gestión del riesgo. *Boletín Científico Sapiens Research*, 2(1), 13-17.

Gómez P.A., Kaus A., Jimenez O.J., Bainbridge D. y Rorive V.M., 1993: Mexico. En "Sustainable agriculture and the environment in the humid tropics". (Eds BJ Rice, JL Overton) pp. 483–548. (The National Academies Press: Washington, DC).

Hartmann H. C., Pagano T. C., Sorooshian S. y Bales R., 2002: Confidence Builders: evaluating seasonal forecasts from user perspective. *American Meteorological Society*. Mayo 2002, pag. 683-700.

Holle R. L. y Cummins K. L., 2016: Seasonal Lightning Distributions Over North America. 24th Lighting Detection Conference. San Diego California.

Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E.P., Gao X. y Ferreira L.G., 2002: Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices, *Remote Sensing of Environment* 83 (1-2): 195-213.

Huntington J., Hegewisch K., Daudert B., Morton C., Abatzoglou J., McEvoy D., y Erickson T., 2017: Climate Engine, Cloud Computing of Climate and Remote Sensing Data for Advanced Natural Resource Monitoring and Process Understanding. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 98(11), 2397-2410.

- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), 2013: Guía Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad ante Cambio Climático. Elaborado por Víctor Magaña (consultor).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2009: Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000, serie IV. Conjunto Nacional Dirección General de Geografía. Aguascalientes, Ags., México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2021: Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000, serie VII. Conjunto Nacional. Dirección General de Geografía. Aguascalientes, Ags., México.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2022: Programa Queimadas. Portal do Programa Queimadas do INPE. Disponible en: <https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal/risco-de-fogo-meteorologia>
- James M. V., James S. C, Charles H. L y Toral P. W. (editores), 2016: Effects of drought on forests and rangelands in the United States: A comprehensive science synthesis. Gen. Tech. Rep. WO-93b. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington Office. 289 p.
- Jardel-Peláez E. J., Frausto-Leyva J. M., Pérez-Salicrup D., Alvarado E., Morfín-Ríos J.E., Landa R. y Llamas-Casillas P., 2010: Prioridades de Investigación en Manejo del Fuego en México. Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza. México D.F.
- Jolly W., Cochrane M., Freeborn, P. et al., 2015: Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. Nat. Commun. 6:7537.
- Kirtman B. P., Dughong M. y Johnna M. I., 2014: The North American Multimodel Ensemble: Phase-1 seasonal-to-interannual prediction; Phase-2 toward developing intraseasonal prediction. Bulletin of the American Meteorological Society 95, 585–601.

- Krawchuk M., Cumming S., Flannigan M. y Wein R., 2006: Biotic and abiotic regulation of lightning fire initiation in the mixedwood boreal forest. *Ecology* 87, 458–468.
- Krieger D. J., 2001: The economic value of forest ecosystem services: a review. The Wilderness Society, Washington DC.
- Latham D. y Williams E., 2001: Lightning and forest fires. En: *Forest Fires*. Johnson E. y Miyanishi K. (editores). Academic Press: San Diego, CA. 375–418.
- Lenihan J., Daly C., Bachelet D. y Neilson R. P., 1998: Simulating broadscale fire severity in a dynamic global vegetation model. *Northwest Sci.* 72, 91-103.
- Lertzman K., Fall, J., y Dorner, B., 1998: Three kinds of heterogeneity in fire regimes: at the crossroads of fire history and landscape ecology. *Northwest Sci.* 72, 4-23.
- Magaña V. (editor), 1999: Los impactos de El Niño en México. Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Gobernación. México. 229 p.
- Magaña V. y Neri C., 2012: El reto de la sequía en México. *Revista México Social*, 1(23). 12-14.
- Magaña V. (compilador), 2013: Guía metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad a cambio climático, México, D.F. Instituto Nacional de Ecología y Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo.
- Magaña V., Méndez B., Neri C. y Vázquez G., 2018: El riesgo ante la sequía meteorológica en México. Vol. 9, Núm. 1, enero-abril 2018, 35-48p.
- Maskrey A. (compilador), 1993: Los desastres no son naturales. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina (LA RED).
- McKee T. B., Doesken N. J. y Kleist J., 1993: The relationship of drought frequency and duration to time scales. Eighth Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, Boston.

- McKee T. B., Doesken N. J. y Kleist J., 1995: Drought monitoring with multiple time scales. Proceedings of the Ninth Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, Boston.
- McKenzie D., 2004: La historia del fuego y su relación con el clima. En Villers Ruiz Lourdes y López Blanco Jorge (Editores) (2004). Incendios forestales en México. Métodos de evaluación. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 164 p. ISBN 970-32-1843-1.
- Méndez M. y Magaña V., 2010: Regional Aspects of Prolonged Meteorological Droughts over Mexico and Central America. American Meteorological Society. 23, 1175-1188.
- Minnich, R. A., Sosa Ramírez, J., Franco Vizcaino, E. y Chou, Y. H., 2009: Lightning detection rates and wildland fire in the mountains of northern Baja California, México. *Atmósfera*, 6(4).
- Moritz M. A., Hessburg P. F. y Povak N. A., 2011: Native fire regimes and landscape resilience. En: McKenzie D., Miller C. y Falk D. A. (editores) *The Landscape Ecology of Fire*. Springer: Dordrecht, the Netherlands, 51–86.
- Nagarajan R., 2003: Drought: Assessment, Monitoring, Management and Resources Conservation. Indian Institute of Technology, Bombay.
- National Drought Mitigation Center (NDMC), 1991: The Basics of Drought Planning: A10- Step Process. University of Nebraska-Lincoln.
- National Drought Mitigation Center (NDMC), 2006: What is Drought? Understanding and Defining Drought. University of Nebraska-Lincoln.
- NASA Fire Information for Resource Management (FIRMS) Active Fire Data: MODIS Collection 6 NRT - MODIS Collection 6 NRT Hotspot / Active Fire Detections MCD14DL. Disponible en: <https://earthdata.nasa.gov/firms>
- Narayanaraj G. y Wimberly M., 2011: Influences of forest roads on the spatial pattern of wildfire boundaries. *International Journal of Wildland Fire* 20(6), 792–803.

- Neri, C. y Magaña, V., 2016: Estimation of vulnerability and risk to meteorological drought in Mexico. *Weather, Climate, and Society*, 8(2), 95-110.
- NOAA-GFDL, 2014: GFDL-CM2p1 model output prepared for CMIP5, served by ESGF. World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ.
- Nobre C. A. y De Simone B. L., 2009: 'Tipping points' for the Amazon Forest. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 1, 28–36.
- North American Regional Reanalysis (NARR), 2004: A long-term, consistent, high-resolution climate dataset for the North American domain, as a major improvement upon the earlier global reanalysis datasets in both resolution and accuracy, Fedor Mesinger et al., submitted to BAMS 2004.
- Ortega U. T, Mastrangelo M. E., Villarroel T. D., Piaz A. G, Vallejos, et al., 2014: Estudios transdisciplinarios en socio-ecosistemas: reflexiones teóricas y su aplicación en contextos latinoamericanos; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático; *Investigación Ambiental*. 6 (2), 123-136.
- Parisien M. A. y Moritz M. A., 2009: Environmental controls on the distribution of wildfire at multiple spatial scales. *Ecological Monographs* 79(1), 127–154.
- Pérez V. G., Márquez L. M., Cortés O. A. y Salmerón-M. M., 2013: Análisis espaciotemporal de la ocurrencia de incendios forestales en Durango, México. *Madera y Bosques* 19(2), 37-58.
- Pompa G. M., Camarero J. J., Rodríguez T. D. y Vega N. D., 2018: Drought and spatiotemporal variability of forest fires across Mexico. *Chinese Geographical Science* 28, 25–37.
- Pyrke, A. F. y Marsden-Smedley J. B., 2005: Fire-attributes categories, fire sensitivity, and flammability of Tasmanian vegetation communities. *Tasforests* 16: 35-46.
- Resilience Alliance, 2010: Assessing resilience in social-ecological systems: Workbook for practitioners. Version 2.0. Disponible en: <http://www.resalliance.org/3871.php>

- Ressl R. y Cruz I., 2012: Detección y monitoreo de incendios forestales mediante imágenes de satélite. CONABIO. *Biodiversitas* **100**, 12-13.
- Rodríguez T. D. y Fulé P. Z., 2003: Fire ecology of Mexican pines and a fire management proposal. *International Journal of Wildland Fire*. 12, 23-37.
- Rousse J. W., Haas R. H., Schell J. A y Deering D. W., 1974: Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, *Proceedings, Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, Greenbelt: NASA SP-351, 3010-317.
- Sanahuja R. H., 1999: El daño y la evaluación del riesgo en América central: una propuesta metodológica tomando como caso de estudio a Costa Rica. Tesis de Maestría en Geografía. Universidad de Costa Rica. 119 pp
- Sanderson E. W., Jaiteh M., Levy M. A., Redford K.H., Wannebo A. V. y Woolmer G., 2002: The human footprint and the last of the wild. *BioScience* 52: 891.
- Schmoldt D. L., Peterson D. L., Keane R. E., Lenihan J. M., McKenzie D., Weise D. R., y Sandberg D. V., 1999: Assessing the effects of fire disturbance on ecosystems: a scientific agenda for research and management. USDA Forest Service General Technical Report PNW-GTR-455.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2016: Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. Edición 2015.
- Spangenberg J. H., 2011: Sustainability science: a review, an analysis and some empirical lessons. *Environmental Conservation*, 38(3): 275-287.
- Sturtevant B. R. y Cleland D. T., 2007: Human and biophysical factors influencing modern fire disturbance in northern Wisconsin. *International Journal of Wildland Fire* 16, 398–413.
- Syphard A. D., Radeloff V. C., Keely J. E., Hawbaker T. J., Clayton M. K., Stewart S. I. y Hammer R. B., 2007: Human influence on California fire regimes. *Ecological Applications* 17(5), 1388–1402.

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

The United States Department of Agriculture (USDA), 2014: Wildfire Hazard Potential. United States Forest Service. Disponible en: <https://usda-lnr.opendata.arcgis.com/maps/LNR::usda-usfs-wildfire-hazard-potential/explore>

Wildlife Conservation Society (WCS) and Center for International Earth Science Information Network (CIESIN), 2005: Last of the Wild Project, Version 2, 2005 (LWP-2): Global Human Influence Index (HII) Dataset (Geographic). Disponible en: <http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/wildareas-v2-human-influence-index-geographic>

Zúñiga V. J., Cisneros G. D., Pompa GM, Rodríguez T. D. y Pérez V. G., 2017a: Spatial modeling of forest fires in Mexico: an integration of two data sources. *Bosque* 38, 563–574.

Zúñiga V. J., Cisneros-G. D. y Pompa G. M., 2017b: Drought regulates the burned forest areas in Mexico: the case of 2011, a record year. *Geocarto International*, 34:5, 560-573.