



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**Estimación de las emisiones de gases de efecto
invernadero y carbono negro por incendios forestales en
la corona regional de la Ciudad de México**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
Licenciada en Ciencias de la Tierra**

PRESENTA

Estefanía Bulnes Aquino

DIRECTORA DE TESIS

M. en C. Xochitl Cruz Núñez

Ciudad Universitaria, CD. MX., 2017





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.

1. Datos del alumno

Bulnes
Aquino
Estefanía
56 77 24 96
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Ciencias de la Tierra
309013945

2. Datos del tutor

M. en C.
Xochitl
Cruz
Núñez

3. Datos del sinodal 1

Dr.
José Antonio Benjamín
Ordóñez
Díaz

4. Datos del sinodal 2

Dra.
Claudia Inés
Rivera
Cárdenas

5. Datos del sinodal 3

Dr.
Harry
Alvarez
Ospina

6. Datos del sinodal 4

M. en C.
Jorge Enrique
Vega
Marrot

7. Datos del trabajo escrito.

Estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero y carbono negro por incendios forestales en la corona regional de la Ciudad de México
49 p.
2017

“Hay quien cruza el bosque y sólo ve leña para el fuego.”

León Tolstói

(1828-1910)

ÍNDICE

GLOSARIO	1
RESUMEN	2
ABSTRACT	3
AGRADECIMIENTOS	4
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	5
1.1 GASES DE EFECTO INVERNADERO.....	6
1.2 CARBONO NEGRO.....	7
1.3 INCENDIOS FORESTALES.....	8
OBJETIVO GENERAL	9
JUSTIFICACIÓN	9
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES	10
2.1 TIPOS DE INCENDIO.....	10
2.2 VARIABLES QUE FAVORECEN LA INCIDENCIA DE INCENDIOS.....	10
2.2.1 <i>Topografía</i>	11
2.2.2 <i>Clima</i>	11
2.2.3 <i>Vegetación</i>	12
2.3 IMPACTO DEL FUEGO EN LA CALIDAD DEL AIRE.....	12
2.6 IMPACTO EN EL AGUA Y EN EL SUELO.....	14
2.7 INCENDIOS FORESTALES EN EL CAMBIO DE USO DE SUELO.....	14
2.7.1 <i>Impacto en el paisajismo y la estética del bosque</i>	15
2.8 IMÁGENES MODIS.....	16
2.8.1 <i>Productos oficiales de superficies quemadas (Official Burned Area Product [MCD45A1])</i>	17
2.8.2 <i>Tipos de cobertura usando MODIS</i>	17
2.8.3 <i>Validación del producto MODIS MCD45A1</i>	18
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	19
3.1 ÁREA DE ESTUDIO.....	19
3.2 VISUALIZACIÓN DE LOS INCENDIOS EN UN MAPA.....	20
3.3 GENERACIÓN DE UNA BASE DE DATOS.....	20
3.4 ESTIMACIÓN DE LAS EMISIONES.....	20
3.5 BÚSQUEDA DE LAS VARIABLES DE LA ECUACIÓN.....	21
3.6 ESTIMACIÓN DE LAS EMISIONES.....	23
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	38
CAPÍTULO 6. LITERATURA CITADA	39

Índice de Tablas

TABLA 1. FACTORES DE EMISIÓN ($G\text{ KG}^{-1}$) PARA LOS TIPOS DE COBERTURA QUEMADA.	22
TABLA 2. FACTORES DE COMBUSTIÓN (%) PARA CADA TIPO DE VEGETACIÓN.....	22
TABLA 3. CARGA COMBUSTIBLE (KG/HA) PARA CADA TIPO DE VEGETACIÓN.....	23
TABLA 4. EMISIONES TOTALES (EN TON/AÑO) DE LA CORONA REGIONAL DE LA CIUDAD DE MÉXICO DURANTE EL PERÍODO 2005-2014.	29
TABLA 5. RESUMEN DE LA EMISIONES (TON/AÑO) DE CO_2 , CH_4 , N_2O Y BC DURANTE EL PERÍODO 2005-2014 PARA CADA TIPO DE COBERTURA.	29
TABLA 6. INCERTIDUMBRES COMBINADAS PARA CADA CONTAMINANTE Y COBERTURA DE VEGETACIÓN USADAS EN EL CÁLCULO DE LAS EMISIONES.	30
TABLA 7. COMPARACIÓN DE LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO	32
TABLA 8. COMPARACIÓN DE LAS EMISIONES DE CARBONO NEGRO	33

Índice de Figuras

FIGURA 1. ESQUEMA DEL IMPACTO DE LOS INCENDIOS FORESTALES AL MEDIO AMBIENTE	15
FIGURA 2. ÓRBITA POLAR QUE RECORREN LOS SATÉLITES TERRA Y AQUA CADA 1-2 DÍAS	16
FIGURA 3. CORONA REGIONAL DE LA CIUDAD DE MÉXICO.....	19
FIGURA 4. TOTAL DE HECTÁREAS AFECTADAS POR TIPO DE COBERTURA VEGETAL QUEMADA.	24
FIGURA 5. AGRUPACIÓN DE LOS TIPOS DE VEGETACIÓN Y EL ÁREA AFECTADA TOTAL PARA CADA TIPO DE VEGETACIÓN.....	25
FIGURA 6. EMISIONES DE CO ₂ POR LOS INCENDIOS FORESTALES POR ESTADO Y POR AÑO.	26
FIGURA 7. EMISIONES DE METANO POR ESTADO Y POR AÑO.	26
FIGURA 8. EMISIONES DE N ₂ O POR ESTADO Y POR AÑO.	27
FIGURA 9. EMISIONES DE CARBONO NEGRO POR ESTADO Y POR AÑO.	27
FIGURA 10. MAPAS DE EMISIONES TOTALES POR CONTAMINANTE.	28
FIGURA 11. ÁREAS DE SUPERFICIES QUEMADAS	34
FIGURA 12. EJEMPLO DE LA OCURRENCIA DE LOS INCENDIOS FORESTALES EN CERCANÍA CON LAS LÍNEAS CARRETERAS ..	34
FIGURA 13. PRINCIPALES CAUSAS DE INCENDIOS FORESTALES EN EL ÁREA DE ESTUDIOS.	35
FIGURA 14. PROMEDIO MENSUAL DEL NÚMERO DE INCENDIOS OCURRIDOS DEL 2005-2014.....	36
FIGURA 15. RELACIÓN ENTRE PRECIPITACIÓN ANUAL Y NÚMERO DE INCENDIOS.	37

Glosario

CO₂e: Dióxido de carbono equivalente. Medida que se utiliza para comparar diferentes gases de efecto invernadero con base en su potencial de calentamiento global.

CRCM: Corona Regional de la Ciudad de México.

Gg: Gigagramos.

Ton: Toneladas.

Resumen

Se estimaron las emisiones de gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄, N₂O) y carbono negro provenientes de los incendios forestales localizados en la corona regional de la Ciudad de México.

Las emisiones se obtuvieron para la corona regional de la Ciudad de México durante el período 2005-2010 con una ecuación general.

Se obtuvo que los estados con mayor cantidad de emisiones fueron el Estado de México, Morelos y Puebla. Los años 2005, 2009 y 2013 fueron en los que se reportó la mayor cantidad de contaminantes emitidos.

Se encontró que el tipo de cobertura agrícola y bosque son las que más emisiones producen.

La corona regional de la Ciudad de México contribuyó en promedio con el 11% de las emisiones de gases de efecto invernadero y de carbono negro para México.

Finalmente, se sugiere seguir trabajando en mejorar la calidad de la información con la que se cuenta para México.

Abstract

Greenhouse gases (CO₂, CH₄, N₂O) and black carbon emissions from forest fires located in the regional crown of Mexico City were estimated.

Emissions were obtained for the regional crown of Mexico City along the 2005-2010 period by a general equation.

Results show that the states with greater quantity of emissions were the State of Mexico, Morelos and Puebla.

The years 2005, 2009 and 2013 reported the highest amount of pollutants emitted.

Furthermore, it was found that the type of agricultural cover and forest lands produce the major emissions.

The regional crown of Mexico City contributed on average to 11% of greenhouse gases and black carbon emissions to the national total.

Finally, it is suggested to continue working on improving the quality of the information available for Mexico.

Agradecimientos

Mi agradecimiento a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ciencias por permitir mi formación académica.

A mi tutora, la M. en C., Xochitl Cruz Núñez, por permitirme formar parte de su grupo de trabajo, por haberme permitido vivir experiencias enriquecedoras tanto en mi desarrollo profesional como personal y por compartirme su bondad y conocimiento.

A mis sinodales, el Dr. José Antonio Benjamín Ordóñez Díaz, la Dra. Claudia Inés Rivera Cárdenas, el Dr. Harry Alvarez Ospina y al M. en C. Jorge Enrique Vega Marrot, por sus consejos y aportaciones que me ayudaron a mejorar este trabajo.

A la M. en C. Blanca Estela Ríos Ramos del grupo de interacción micro y meso escala, del Centro de Ciencias de la Atmósfera, por brindarme herramientas que hicieron posible la realización de este trabajo.

A las personas que me he encontrado en distintas etapas de mi vida y que me han mostrado lo mejor de ellas, a Betty, Carmen, Yaz, Avril y Mariana por vivir momentos felices e inolvidables.

A mis hermanos, Karen y Gilberto por ser un ejemplo para mi.

A mis padres, por alentarme, guiarme e impulsarme a superarme cada día.

A Aldo, por aparecer en mi vida y apoyarme, te amo.

A la Comisión Nacional Forestal y a la Secretaría de Desarrollo Sustentable del estado de Morelos por proporcionarme sus bases de datos usadas en esta tesis.

Esta tesis es producto del proyecto PAPIIT “Efectos de la variabilidad de la precipitación sobre áreas urbanas y rurales de la corona regional del centro de México” con clave IN105415.

Capítulo 1. Introducción

La Ciudad de México (CDMX) ha pasado por distintas fases de desarrollo, colocandola como el lugar del país en que se encuentran las mejores ofertas laborales, con gran cantidad de comercios, industria, la mejor movilidad y una mejor calidad de vida (Molina y Molina, 2002; Delgado, 1998). Esto ha causado que los habitantes de los estados más próximos, provenientes de zonas rurales, busquen formar parte de la CDMX. Sin embargo, por el costo de vida tan alto que se tiene en la ciudad se ven obligados a vivir en las zonas periféricas. Esto conlleva a la necesidad de crear nueva infraestructura y vías de comunicación entre las zonas periféricas y la ciudad que hagan posible el traslado diario de la población (Delgado, 1998).

Tal ha sido la afluencia de la población en estas zonas periféricas que se han transformado en subcentros, generando en las áreas intermedias lugares propicios para el comercio debido al alto tránsito que se genera en estas áreas (Delgado, 1998).

A toda esta conurbación en torno a la CDMX se le ha denominado corona regional de la CDMX, la cual en 1990 tenía una población aproximada de 21 millones de habitantes, es decir el 24% de la población nacional. Después de 20 años la población que habitaba en la corona era de 35,418,952 de personas (INEGI, 2010) que representaba el 32 % de la población total del país.

Es así como la extensión de la infraestructura por la creación de caminos, vías y asentamientos humanos, ha sido una causa directa de la deforestación (Pineda *et al.*, 2010), acompañada de incendios forestales, para abrir espacio a la infraestructura urbana que demanda la población en aumento.

El crecimiento demográfico y la densidad y distribución espacial de la población se considera una causa indirecta de la pérdida de cobertura forestal (Pineda *et al.*, 2010).

La tasa de deforestación en México durante el período 2005-2010 fue de 155 mil hectáreas por año, lo cual posiciona al país entre los primeros lugares en tasas de deforestación en el mundo (FAO, 2010). La deforestación genera la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera, contribuyendo con esto al cambio climático (de Jong, 2010). Además, la ausencia de vegetación debido a la tala reduce los sumideros de CO₂.

En México el sector de uso de suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura se consideró como la segunda fuente de emisiones de gases de efecto invernadero después del consumo de combustibles fósiles (INE-Semarnat, 2001., citado en de Jong, 2010).

Es así que la estimación de las emisiones en la corona regional de la CDMX cobra relevancia, ya que por ser una zona con un constante cambio de uso de suelo de rural a urbano, se espera que su contribución de gases de efecto invernadero sea significativa.

1.1 Gases de efecto invernadero

Los gases de efecto invernadero son aquellos gases que absorben la radiación reflejada de la superficie de la Tierra y la emiten en longitudes de onda en el infrarrojo, causando por ello el efecto invernadero que ha permitido el desarrollo de la vida en la Tierra, mediante una temperatura agradable y estable (IPCC, 2013).

Los principales gases de efecto invernadero en la atmósfera de la Tierra emitidos debido a la actividad humana a nivel mundial son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), y el óxido nitroso (N₂O) (IPCC, 1992; Santillán *et al.*, 2016).

Cada uno de los gases de efecto invernadero posee un determinado potencial de calentamiento global. El potencial de calentamiento global expresa el potencial de calentamiento de un gas en comparación con el que posee el mismo volumen de CO₂ durante un mismo período de tiempo (IPCC, 2013). El potencial de calentamiento global es de 1 para el CO₂, 25 para el CH₄ y 298 para el N₂O en 100

años. Esta medida compara el impacto climático global de las emisiones de estos gases (IPCC, 2007).

1.2 Carbono negro

El carbono negro (CN o BC por sus siglas en inglés) es un componente del hollín, producido por la quema incompleta de combustibles fósiles (principalmente de petróleo, diésel y gasolina) y biomasa (madera, carbón, etc.) (CSE, 2012).

El carbono negro es liberado en forma de partícula y por lo tanto pertenece a la categoría de material particulado, no a la de gas de efecto invernadero (CSE, 2012).

El carbono negro es un contaminante de vida corta y forzador del clima cuyo potencial de calentamiento global se estima en un rango de 460 a 5,000 (Molina, 2009; EPA, 2012), posicionándolo como el segundo o tercer controlador del clima detrás del CO₂ a escala global (Bachmann, 2009; Shindell y Faluvegi, 2009., citado en Cruz.Núñez *et al.*, 2014).

Se considera al carbono negro en la realización de los inventarios de gases de efecto invernadero, para contribuir a inventarios más completos, ya que de los componentes que se emiten a la atmósfera el carbono negro es la principal sustancia que absorbe radiación solar (Bahadur *et al.*, 2011., citado en Cruz-Núñez *et al.*, 2014).

Excluyendo las quemas agrícolas, las estimaciones recientes sugieren que los incendios forestales cuentan con aproximadamente la mitad de las emisiones globales de carbono negro y monóxido de carbono (CO) (Reid *et al.*, 2005; citado en Langmann *et al.*, 2009).

Dependiendo del tipo de incendio y las condiciones de quema, entre 5 y 10 % de la masa de partículas emitidas puede ser atribuido a carbono negro (Reid *et al.*, 2005; citado en Langmann *et al.*, 2009).

1.3 Incendios forestales

Un incendio forestal es considerado una perturbación que, con una frecuencia y propagación no controlada, afecta selvas, bosques y vegetación de zonas áridas y semiáridas (Villers y López, 2004). Las emisiones por biomasa quemada incluyen una amplia gama de compuestos gaseosos y partículas que contribuyen a la troposfera a escala local, regional e incluso global (Youssof *et al.*, 2014).

La composición del humo que se genera durante un incendio forestal se ha detectado que puede variar debido a la trayectoria que sigue la flama. Por ejemplo, si un incendio forestal se ubica entre la interfase de un área urbana, es posible que se quemen combustibles distintos de la vegetación, como los desechos (Goldammer *et al.*, 2009; Statheropoulos y Karma, 2007., citado en Youssof *et al.*, 2014). En este caso la composición del humo será el resultado de los productos de emisión de cada tipo de combustible.

Los incendios forestales son un proceso importante en el sistema terrestre con implicaciones para el clima, la composición atmosférica y la calidad del aire (Huang *et al.*, 2015).

Las emisiones de los incendios contribuyen al aporte global de gases de efecto invernadero y partículas de aerosoles (Huang *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2014).

Objetivo general

Realizar un inventario de emisiones de gases de efecto invernadero y del carbono negro provenientes de los incendios forestales registrados en la corona regional de la Ciudad de México durante el período 2005-2014.

Justificación

Contar con un inventario de las emisiones de gases de efecto invernadero y del carbono negro provenientes de los incendios forestales en la corona regional de la Ciudad de México es importante porque permite conocer el grado de la deforestación de la región que refleja la presión por crear infraestructura urbana en esta zona geográfica.

Además, conocer las emisiones de los incendios forestales y su contribución al total nacional permitirá apoyar la toma de decisiones de la política de reducción de emisiones.

Capítulo 2. Antecedentes

2.1 Tipos de incendio

Por el tipo de estrato que se quema los incendios forestales se pueden clasificar en tres tipos: subterráneos, superficiales e incendios de copa. Los subterráneos se producen en las capas orgánicas del suelo forestal. Estos incendios se desarrollan prácticamente sin llama y de manera lenta pero persistente, generando una gran cantidad de calor por lo que resultan muy destructivos para el suelo (Shakesby y Doerr, 2006; Flores, 2009b).

Los incendios superficiales se desarrollan sobre el suelo forestal; consumen el combustible compuesto por los troncos derribados, ramas, hojas, hierba seca, hojarasca, pasto y el renuevo (Velasco, 2016). Son característicos por tener una rápida propagación, con sus llamas y las humaredas que produce. Son los más comunes en México (Flores, 2009b).

En los incendios de copa se produce la quema en la capa superior del follaje de árboles y arbustos. Normalmente son causados por un incendio superficial (Velasco, 2016), ocurren al incendiarse la resina de los árboles o por la presencia del viento que aviva las llamas de manera que alcanzan al follaje. Son muy comunes en los bosques de coníferas debido a la acumulación de hojas muertas y secas. Este tipo de incendios es poco frecuente en México (Martínez *et al.*, 1989., Cedeño, 1999).

2.2 Variables que favorecen la incidencia de incendios

La ocurrencia de un incendio forestal está determinada por diversos factores, entre ellos los característicos de cada lugar, como la composición de los combustibles, la estructura vegetal, el clima y la topografía (Cruz *et al.*, 2011; Shakesby y Doerr, 2006; Yakubu *et al.*, 2015; Velasco, 2016) y por variables transitorias como la

temperatura, la humedad relativa, la precipitación pluvial así como la dirección y velocidad del viento (Estrada, 2016).

2.2.1 Topografía

Los incendios forestales suelen propagarse más rápido cuando se generan a favor de la pendiente y aumenta su velocidad a medida que la pendiente se incrementa (Flores, 2009b). Las variables topográficas que más influencia tienen en los incendios forestales son:

a) Pendiente

Influye directamente en la velocidad de propagación del incendio. Se tiene una mayor velocidad de propagación a una mayor pendiente del terreno (Flores, 2009b).

b) Exposición

Es fundamental para estimar las condiciones de humedad y horas luz en los bosques. De acuerdo a su latitud, en México los terrenos con exposición sur son los que reciben la mayor incidencia de rayos solares. Es aquí en donde se tienen altas temperaturas, la humedad relativa es baja y los vientos son de mayor intensidad. Todas estas condiciones propician la generación de incendios (Flores, 2009b).

2.2.2 Clima

En lugares donde se presentan altas temperaturas y la humedad relativa es baja, suelen favorecer el inicio de un incendio forestal (Hudson y Salazar, 1981., citado en Flores, 2009b).

Los aspectos del clima que más influencia tienen en los incendios son:

a) Temperatura

Cuando se presentan temperaturas muy altas, más baja es la humedad del ambiente y por lo tanto los combustibles forestales pierden mucha agua, se secan rápidamente y con esto son más susceptibles a arder con facilidad (Flores, 2009b).

b) Viento

El viento influye en el ritmo de evaporación y en la humedad de los combustibles forestales; cuando se tiene una mayor velocidad del viento, hay mayor efecto en el secado de los combustibles (Flores, 2009b).

c) Precipitación

La precipitación influye en la facilidad de ocurrencia de un incendio, Ramírez (2012) determinó que cuando la cantidad de lluvia se encuentra por debajo de los 20mm en un período mensual la probabilidad de que se genere un incendio es alta.

2.2.3 Vegetación

El tipo de vegetación es otro factor de relevancia para que un incendio forestal se genere. En México, los matorrales ocupan una gran área del territorio con aproximadamente 25.98% del área total. Este es seguido por los bosques con 17.51%, selvas 14.24%, granjas 13.52% y pastizal con 13.25%. Estos tipos de vegetación ocupan el 84.5% del territorio (Bautista *et al.*, 2014).

Teniendo en cuenta la incidencia de incendios forestales en los diferentes tipos de vegetación muestra la importancia relativa que tiene cada ecosistema para el estudio y manejo de los incendios.

2.3 Impacto del fuego en la calidad del aire

Los incendios emiten una variedad de gases y aerosoles a la atmósfera, incluyendo CO₂, CO, óxidos de nitrógeno (NO_x), compuestos orgánicos volátiles y semi-volátiles (VOC y SVOC), material particulado (PM), amoníaco (NH₃), dióxido de azufre (SO₂), y CH₄ (Wiedinmyer *et al.*, 2006; Langmann *et al.*, 2009).

Las emisiones de gases y aerosoles debido a los incendios son transportadas a través de la atmósfera (Figura 1), degradando la calidad del aire por la reducción en

la visibilidad, generando niveles insanos de PM, y reaccionando para crear gases tóxicos troposféricos, como el ozono (O₃) (Wiedinmyer *et al.*, 2006).

La cantidad de emisión de humo depende del combustible que se quema especialmente de hojarasca y de combustibles vivos y al comportamiento del fuego especialmente de la intensidad del fuego, si éste es a favor o en retroceso (Chandler *et al.*, 1983., citado en Flores, 2009a).

La emisión de partículas tiene el mayor potencial para causar contaminación del aire debido a su cantidad (3 a 100 Kg, con un promedio de 50 Kg por tonelada de combustible quemado), a su efecto en la visibilidad debido a la preponderancia de partículas submicrométricas y a sus altos contenidos de materia orgánica (Flores, 2009a).

Dentro de los contaminantes atmosféricos que los incendios forestales emiten a la atmósfera se encuentran las siguientes (Gordon, 2006):

- Monóxido de carbono: gas tóxico, precursor del ozono.
- Mercurio atmosférico: puede caer o precipitar después de un incendio, entra a cuerpos de agua y se convierte en metil-mercurio, compuesto neurotóxico.
- Compuestos orgánicos volátiles: compuestos por hidrocarburos parcialmente oxidados, que una vez mezclados con algún tipo de contaminante industrial, empeoran las condiciones del humo.
- Partículas de material fino: partículas de hollín y ceniza muy pequeñas para filtrarse a través del sistema respiratorio, provocando irritación en mucosas y un incremento al riesgo de cáncer.

Dichas emisiones de partículas, además de llegar a cubrir grandes extensiones, pueden ser transportadas a grandes distancias incluso a nivel continental (Villers y López, 2004). Algunos ejemplos son:

- 1) El humo de los incendios en el este de Kalimantan (Isla de Borneo, Indonesia) se propagó en el otoño de 1998 sobre seis países, afectando principalmente, a Malasia, Tailandia y Filipinas (BBC, 1998).

- 2) Los incendios forestales ocurridos en México emitieron altas concentraciones de partículas en el oeste de los Estados Unidos durante el verano de 1998 (Villers y López, 2004).

Los incendios forestales también generan gases de efecto invernadero a la atmósfera y partículas forzadoras del clima, por lo que se deben estimar las emisiones de estos contaminantes de efecto invernadero y poder determinar la magnitud de sus efectos sobre la atmósfera y la salud humana (Catillo *et al.*, 2003).

2.6 Impacto en el agua y en el suelo

Los incendios forestales pueden modificar los procesos hidrológicos, al reducir la infiltración e incrementar los escurrimientos superficiales propiciando la erosión del suelo (Ferreira *et al.*, 2008; Alanis *et al.*, 2009; Martínez *et al.*, 2009).

2.7 Incendios Forestales en el cambio de uso de suelo

El desarrollo de la agricultura se vio favorecido por el uso del fuego; se cree que uno de los motivos por los que la agricultura surgió y se expandió rápidamente en el Mediterráneo fue la facilidad de quemar y por lo tanto de deforestar estos ambientes. Las quemas practicadas por los humanos y la fragmentación del paisaje y del combustible, debido a la expansión de la agricultura y las viviendas, hizo que el régimen de incendios fuera cambiando durante la historia, disminuyendo la frecuencia en algunos sitios y aumentando en otros (Pausas, 2012).

En la actualidad más áreas humanas son responsables de iniciar más incendios. Sin embargo la mayoría de las igniciones causadas por humanos son accidentales. Los incendios provocados también son una causa importante en todo el mundo y tienden a aumentar con la intensidad del uso de la tierra (Van Bustsic *et al.*, 2015).

2.7.1 Impacto en el paisajismo y la estética del bosque

Los sistemas forestales brindan muchos beneficios ecosistémicos entre los que resalta la regulación del clima, servicios de soporte, recreación y aprovisionamiento. Estos servicios se ven desperdiciados debido a la falta de cuidado y educación ambiental.

Según los reportes de Semarnat (2014) en México el 99% de los incendios forestales son causados por la actividad humana.

El fuego ha sido una de las fuerzas naturales más dramáticas que ha afectado a las comunidades vegetales a lo largo del tiempo y mientras que unas especies o comunidades son beneficiadas después de un incendio, otras son limitadas o eliminadas (Flores y Cabrera, 2009). En la ausencia de incendios, las especies longevas y aquellas que se pueden regenerar y crecer bajo árboles adultos, se volverán dominantes. La sucesión inducida por el fuego está relacionada con las adaptaciones que poseen especies individuales de plantas para colonizar, crecer y sobrevivir (Flores y Cabrera, 2009).

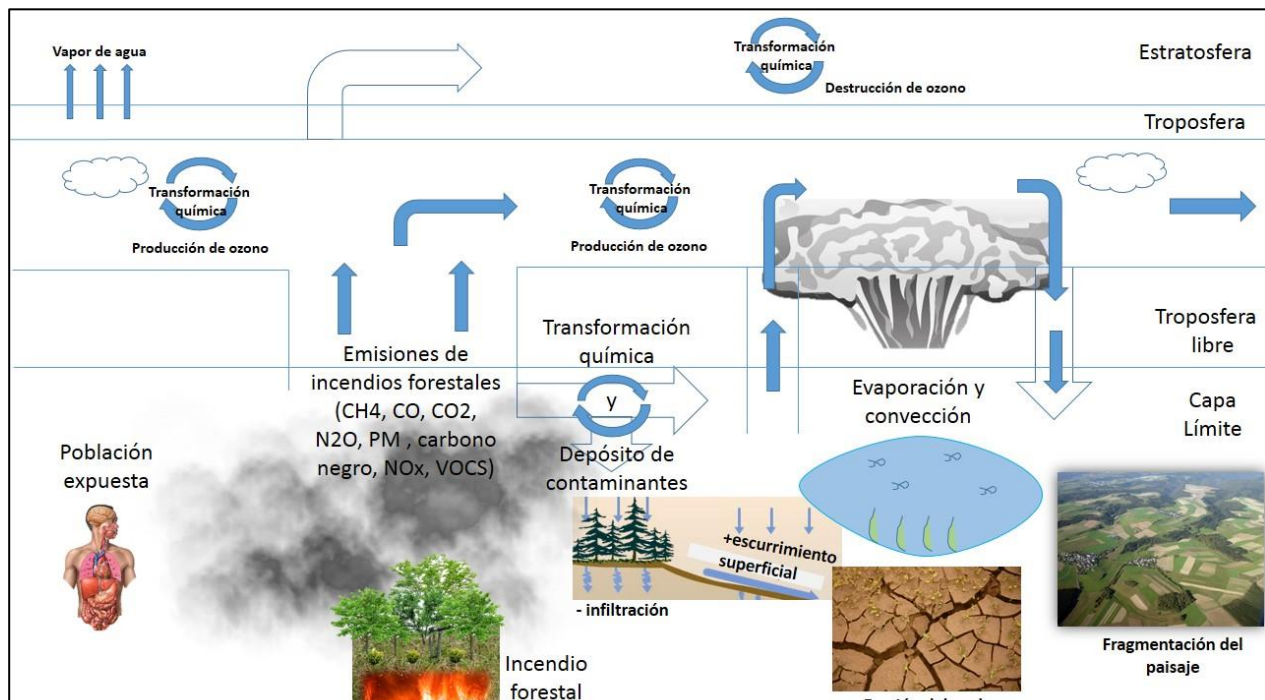


Figura 1. Esquema del impacto de los incendios forestales al medio ambiente (adaptación del esquema de Rekacewicz, 2003). Se muestra que las emisiones de los incendios forestales no solo afectan de forma local, sino que tienen varias implicaciones en los diferentes sistemas terrestres. Afectan a la atmósfera ocasionando una mala calidad del aire e interfiriendo en la entrada y salida de radiación. En la tierra, parte de los contaminantes se depositan en el suelo dando como resultado una menor infiltración de agua, lo que da como resultado un aumento en la escorrentía superficial que degenera en la erosión del suelo. Este proceso altera consecuentemente al ciclo hidrológico. Por otra parte, se tienen implicaciones en el paisaje por la fragmentación de los ecosistemas debido al uso del fuego para cambiar el uso del suelo. Y todo esto tiene implicaciones directas sobre la biósfera, pues la población queda expuesta a los contaminantes emitidos, y la fauna y flora del planeta también ve alterado su ecosistema.

2.8 Imágenes MODIS

El sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, por sus siglas en inglés) es un instrumento que viaja a bordo de los satélites Terra y Aqua a una altitud de 705 km sobre la Tierra, ofreciendo una visión de la superficie de la Tierra cada 1-2 días (Cruz *et al.*, 2011; NASA, 2016).

La órbita de Terra viaja alrededor de la Tierra del norte al sur cruzando el Ecuador por la mañana, mientras que el Aqua viaja del sur al norte cruzando el Ecuador por la tarde (Figura 2).

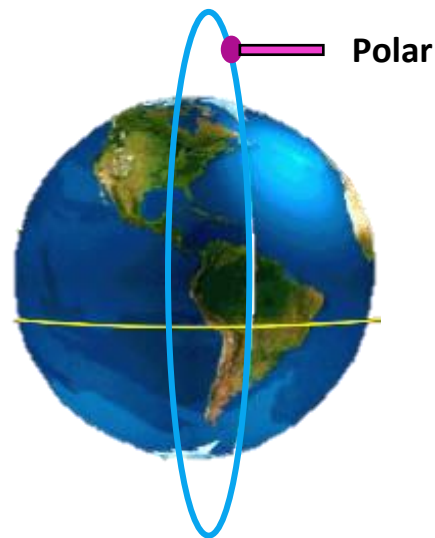


Figura 2. Órbita polar que recorren los satélites Terra y Aqua cada 1-2 días (modificado de http://fisicamoderna.blog.uol.com.br/arch2008-02-17_2008-02-23.html)

El sensor MODIS recoge datos dentro de 36 bandas espectrales, que varían en longitudes de onda de 0,4 μm a 14,4 μm y proporciona imágenes con una resolución nominal de 250 m en nadir para dos bandas, 500 m de resolución para 5 bandas y las 29 bandas restantes en 1 km (NASA, 2016).

2.8.1 Productos oficiales de superficies quemadas (Official Burned Area Product [MCD45A1])

El MCD45A1 es un producto mensual de nivel 3 con resolución de 500 metros. El cual utiliza los satélites Terra y Aqua, su algoritmo utiliza los cambios espectrales, temporales y las características estructurales de la vegetación para identificar y cartografiar áreas quemadas. Este algoritmo analiza la dinámica de la reflectancia diaria de la superficie para localizar los cambios rápidos, con esta información detecta la fecha aproximada de la quema y mapea la extensión espacial de los incendios recientes (García y Mas, 2011).

Utiliza restricciones estadísticas dentro del algoritmo para identificar las áreas quemadas persistentes y omitir posibles detecciones falsas causadas por sombras, nubes, agua y suelos oscuros.

2.8.2 Tipos de cobertura usando MODIS

Los datos de MODIS utilizados en la clasificación incluyen un año completo de observaciones. Las entradas contienen datos de Normalized BRDF-Adjusted Reflectance y MODIS Land Surface Temperature.

El MCD12Q1 proporciona mapas globales del uso de suelo anualmente, con resolución espacial de 500m desde el 2001 hasta el presente. Contiene cinco esquemas de clasificación, las cuales describen las propiedades de cobertura del suelo.

En el presente trabajo se utilizará el primer esquema de clasificación, el cual identifica 17 clases de cobertura del suelo definidos por el Programa Internacional Geósfera-Biósfera (IGBP), que incluye 11 clases de vegetación, 3 clases de suelos desarrollados y mosaicos, y 3 clases de suelos sin vegetación (Friedl *et al.*, 2010).

2.8.3 Validación del producto MODIS MCD45A1

En el trabajo de da Silva *et al.* (2012) realizado en el bosque tropical del Amazonas en Brasil, evaluaron el producto de áreas quemadas MCD45A1 derivado del sensor MODIS comparando esta base de datos con los datos de referencia derivados del mapeo de áreas quemadas en Brasil adquiridos por el sensor abordo mapeador temático (TM por sus siglas en inglés) de LANDSAT 5 y con un campo de trabajo que tomó lugar en Noviembre del 2011. Los resultados mostraron que el producto de los MCD45A1 presentó el 93% de omisión de errores en 2010 y 96% en 2011 en relación a los datos de referencia, concluyendo que presentan baja confianza en la identificación de áreas quemadas en la región del Amazonas.

Por otra parte, Tsela *et al.* (2014) validaron el producto MCD45A1 a través de seis sitios de estudio en Sur África usando datos de referencia de LANDSAT derivados independientemente para áreas quemadas durante los incendios del 2007. Los resultados mostraron que las MCD45A1 presentan altas probabilidades de detección (entre 3.0%-37.9%) para fracciones pequeñas $\leq 50\%$.

CAPÍTULO 3. Metodología

3.1 Área de estudio

La corona regional de la Ciudad de México está constituida por la CDMX, y cinco estados vecinos; el Estado de México, Hidalgo, Morelos, Puebla y Tlaxcala. Ocupa una superficie de 86, 720 km² (Delgado, 1998), Figura 3.

Corona Regional de la Ciudad de México

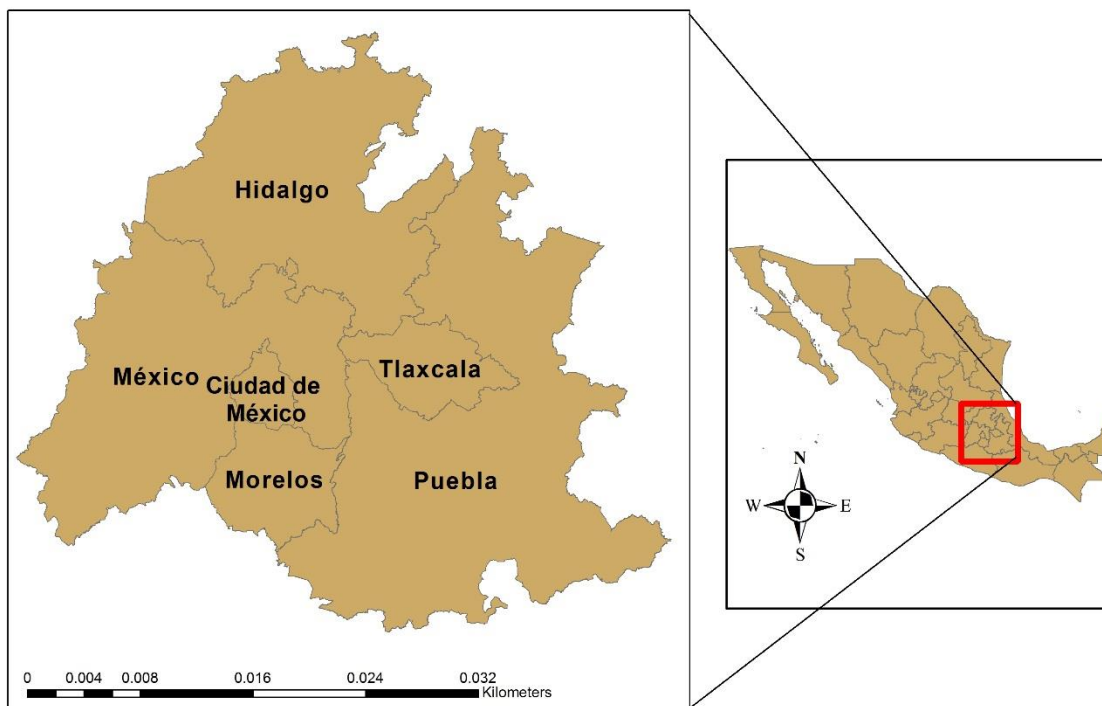


Figura 3. Corona regional de la ciudad de México, ubicada en el centro de México.

3.2 Visualización de los incendios en un mapa

Se eligió una serie de tiempo de 10 años (2005-2014) del producto MCD45A1 colección 5.1.

Con los datos del producto MCD45A1 se hizo una interpolación a una malla regular de 10 km x 10 km, para visualizar mejor la densidad de los incendios en un mapa.

Se aplicó un script de Python en ArcMap para visualizar la distribución espacial de los incendios y ver qué tipo de vegetación se había afectado.

3.3 Generación de una base de datos

Se generó una base de datos en la que se indicó la superficie (en hectáreas) afectada de vegetación para cada estado durante cada año del período de estudio. Esto se calculó de la siguiente manera: asumiendo que un pixel del incendio visualizado en ArcMap equivale a 500m x 500m. Así, para el total de pixeles que cayeron dentro de un determinado tipo de cobertura vegetal se registró su equivalente en hectáreas en una base de datos.

3.4 Estimación de las emisiones

Las emisiones se obtuvieron como un producto de un factor de emisión y un factor de actividad (ecuación 1) (EPA, 2008).

$$E_i = FE_i * A_{(t)}$$

Donde:

E_i es la emisión del contaminante i (en unidad de masa por tiempo t);

A es la actividad de la fuente de emisión.

FE_i es el factor de emisión de la fuente de emisión para el contaminante i (en unidades de masa de contaminante i generados por unidad de actividad A en el tiempo t).

En el caso específico de los incendios forestales, la ecuación (1) se modifica ligeramente en la componente A que contiene los términos siguientes:

$$A = a * c * b \quad (2)$$

Donde:

a es el área quemada durante el incendio (ha).

c es el factor de combustión (%).

b es la carga combustible ($kg_{\text{biomasa}}/\text{ha}$).

Los contaminantes a considerar en el inventario de emisiones son los siguientes, CO_2 , CH_4 , N_2O y BC. Se decidió no considerar los NO_x y el CO porque son precursores del ozono troposférico pero no son contaminantes asociados directamente al cambio climático.

3.5 Búsqueda de las variables de la ecuación

Factor de emisión: Los factores de emisión son generalmente calculados como la masa de una especie emitida en gramos por kilogramo de materia quemada seca. Estos factores tienen una gran variabilidad para diferentes biomas y estos varían de una temporada a otra por la disponibilidad de agua y condiciones del clima. Sin embargo, esta variabilidad no es tomada en cuenta aun en los inventarios de emisiones (Langmann *et al.*, 2009).

Se realizó la búsqueda de los factores de emisión para cada tipo de cobertura afectada

Tabla 1), se determinó que los reportados por Andreae y Merlet (2001); Akagi *et al.* (2011) y Yokelson *et al.* (2011), eran los más completos y actualizados.

Tabla 1. Factores de emisión (g Kg^{-1}) para los tipos de cobertura quemada. Entre paréntesis se indica la incertidumbre asociada.

COMPUESTO	PASTIZAL	BOSQUES	MATORRAL	AGRICULTURA	SELVA	OTRO TIPO DE VEGETACIÓN
CO₂	1660 (± 39)	1647 (± 37)	1710(± 39)	1585 (± 100)	1643 (± 58)	1660 (± 39)
CH₄	4.1 (± 1.06)	3.36 (± 0.92)	2.51(± 0.72)	5.82 (± 3.56)	5.07 (± 1.98)	4.1 (± 1.06)
N₂O	0.21(± 0.10)	0.16(± 0.15)	0.25(± 0.18)	0.07	0.2	0.21 (± 0.10)
CARBONO NEGRO	0.37 (± 0.20)	0.56	1.3	0.69 (± 0.13)	0.52 (± 0.28)	0.37 (± 0.20)

Área quemada: Los datos del área quemada se obtuvieron con el producto MCD45A1.

Factores de combustión: Este factor describe la fracción del combustible disponible que es quemado durante un evento de incendio, dependiendo del tipo de combustible y su contenido de humedad (Langmann *et al.*, 2009).

Los factores de combustión se obtuvieron de los reportados por Bautista *et al.* (2014), Tabla 2.

Tabla 2. Factores de combustión (%) para cada tipo de vegetación.

TIPO DE VEGETACIÓN	FACTOR DE COMBUSTIÓN
MATORRAL	0.95
PASTIZALES	0.96
AGRICULTURA	0.4
OTRO TIPO DE VEGETACIÓN	0.95
BOSQUES	0.3
SELVAS	0.2

Carga combustible: Depende del tipo de vegetación, clima, tipo de suelo, tiempo desde que ocurrió el último incendio u otra perturbación y otros procesos de competencia tales como la herbívora y recolecta de madera para su uso como combustible. La carga de combustible no es idéntica a la biomasa ya que no toda la biomasa está sujeta a un incendio (Langmann *et al.*, 2009).

Para la determinación de la carga combustible se utilizó lo reportado por Bautista *et al.* 2014. De esos datos se obtuvo un promedio para cada tipo de vegetación y se reportó en unidades de masa por unidad de superficie (Tabla 3).

Tabla 3. Carga Combustible (kg/ha) para cada tipo de vegetación.

TIPO DE VEGETACIÓN	MASA COMBUSTIBLE
MATORRAL	1,134
PASTIZALES	3,175
AGRICULTURA	47,627
OTRO TIPO DE VEGETACIÓN	2,948
BOSQUES	68,038
SELVAS	272,155

3.6 Estimación de las emisiones

Habiendo recopilado todos los componentes de la ecuación general en hojas de Excel se aplicó la fórmula para obtener las emisiones de los distintos contaminantes para cada tipo de vegetación afectada.

Capítulo 4. Resultados y discusión

Los tipos de cobertura vegetal afectados por los incendios ocurridos fueron 13 tipos (Figura 4), de los cuales se descartó la cobertura de “estéril o con escasa vegetación”, “humedal permanente” y “urbana y urbanizada”. Los dos primeros porque solo se presentaron en un estado y en una ocasión durante todo el período, la última categoría se descartó por no contar con factores de emisión para el tipo de cobertura.

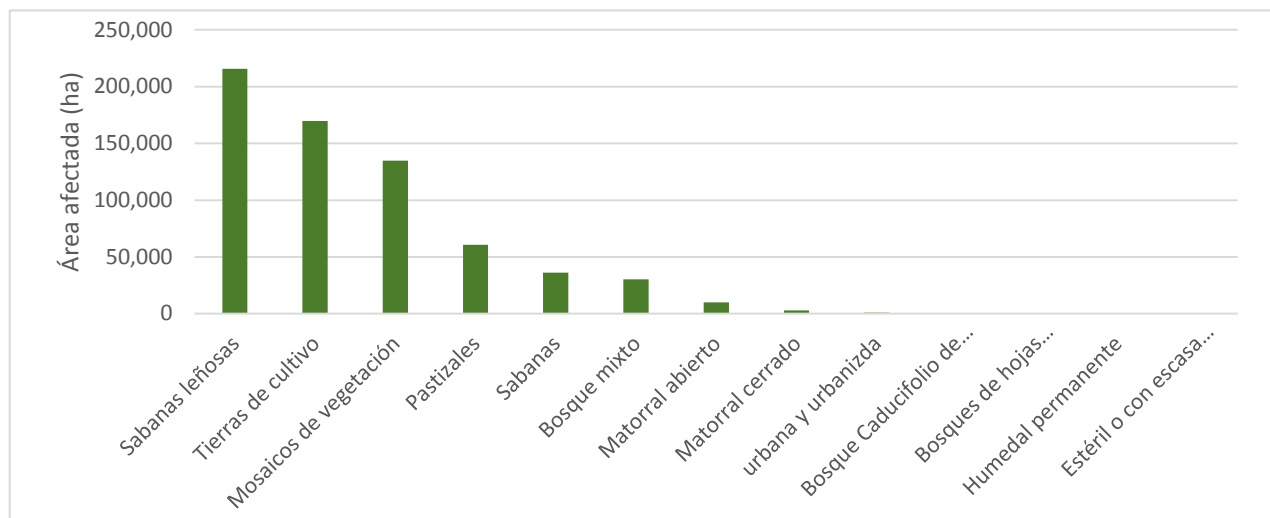


Figura 4. Total de hectáreas afectadas por tipo de cobertura vegetal quemada.

De los 10 tipos de vegetación restantes se agruparon en clases con semejanzas en su descripción y se reagruparon según los tipos de vegetación de INEGI para el tipo de vegetación presente en México (Figura 5).

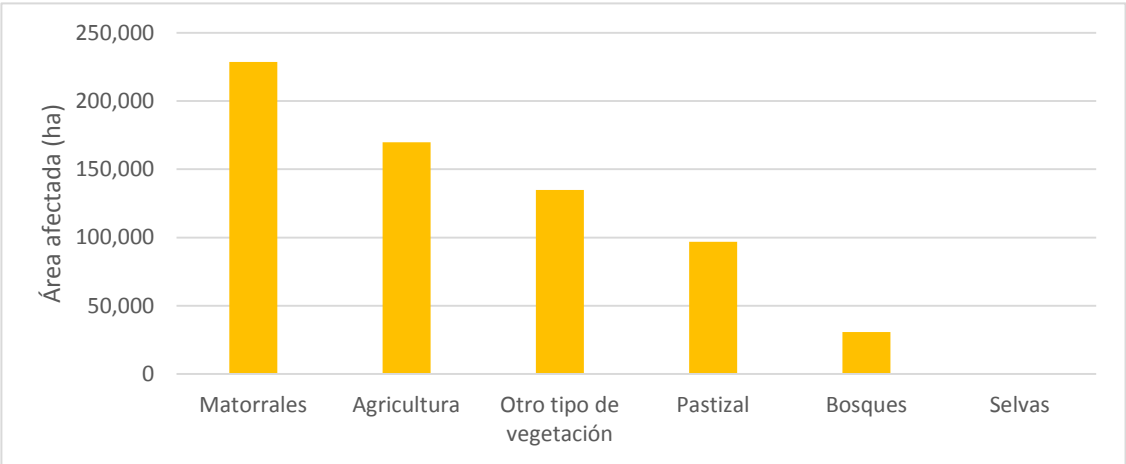


Figura 5. Agrupación y área afectada total para cada tipo de vegetación.

Con la nueva reagrupación se calcularon las emisiones para cada contaminante.

Los resultados de las emisiones (Figura 6, 7, 8 y 9) mostraron que en los años 2009, 2013 y 2005 se presentó la mayor cantidad de emisiones de contaminantes en los seis estados. En la Tabla 4 se resumen las emisiones totales de cada estado durante el período de estudio.

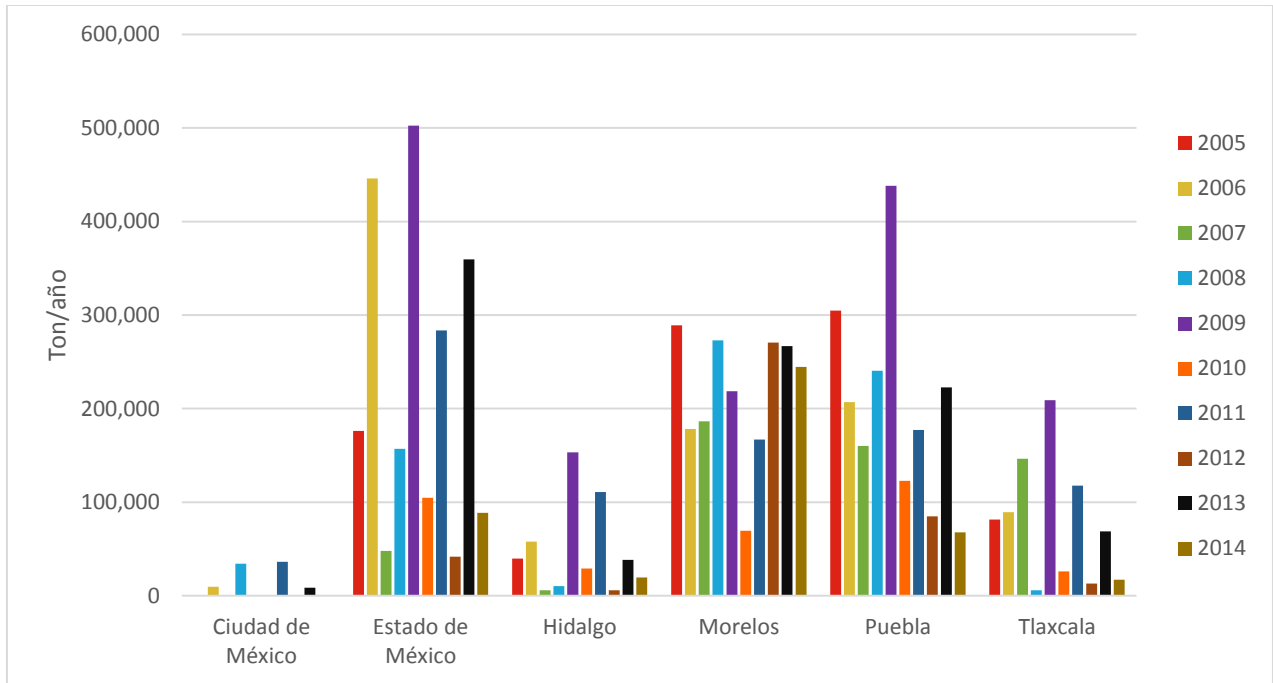


Figura 6. Emisiones de CO₂ por los incendios forestales por estado y por año.

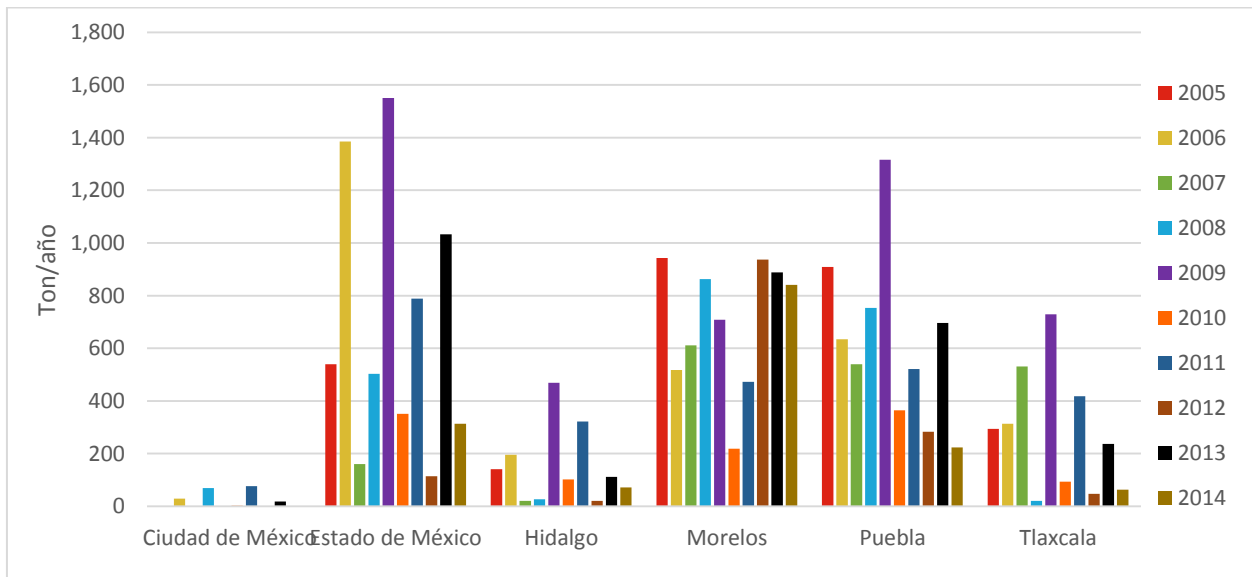


Figura 7. Emisiones de CH₄ por estado y por año.

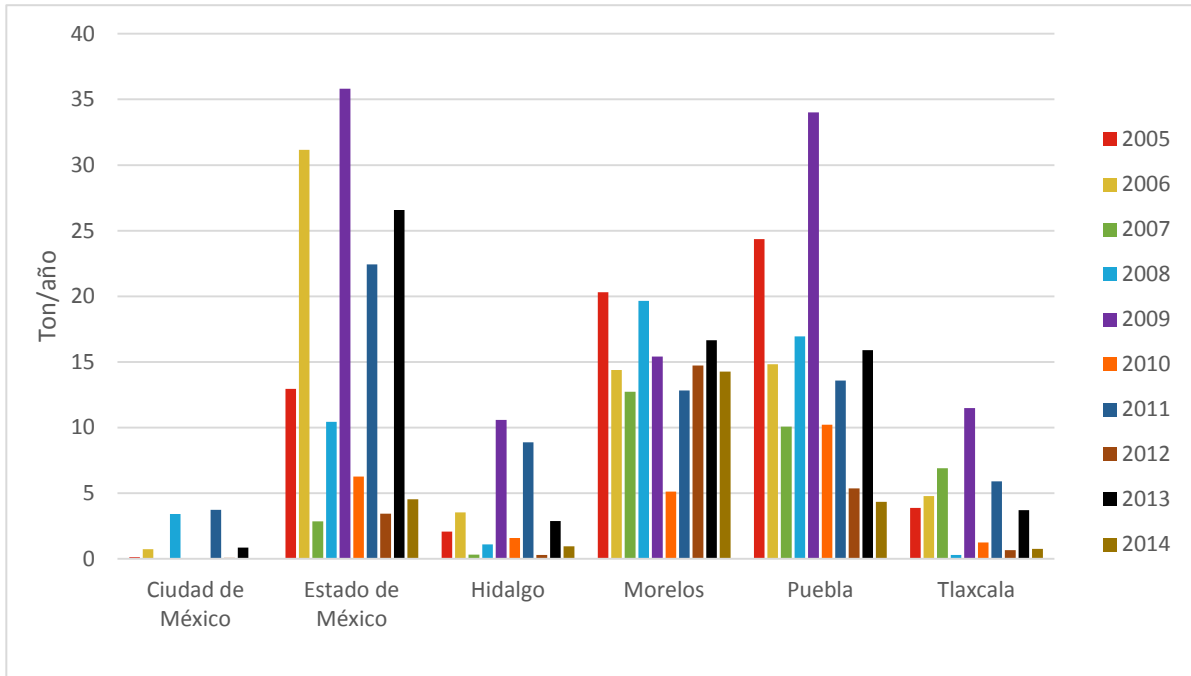


Figura 8. Emisiones de N₂O por estado y por año.

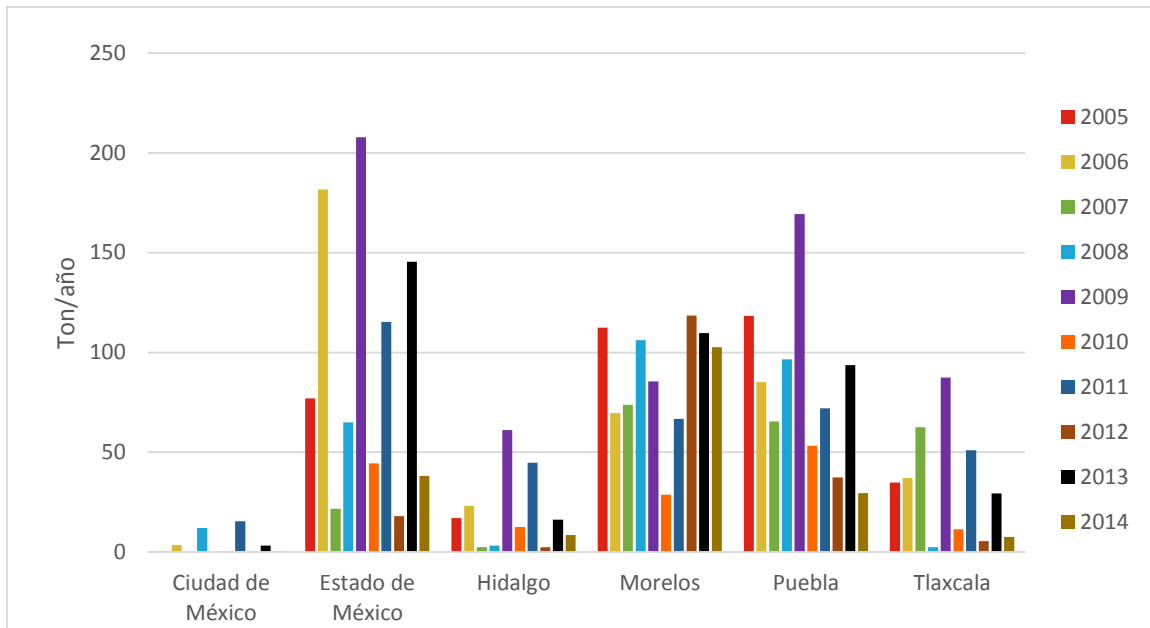
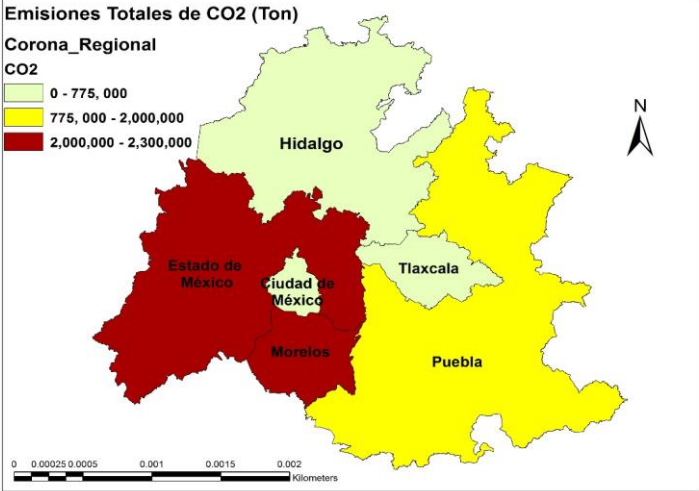
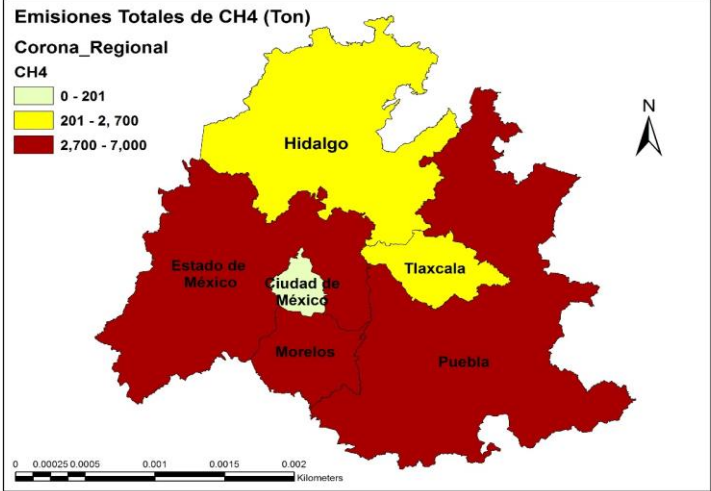


Figura 9. Emisiones de carbono negro por estado y por año.

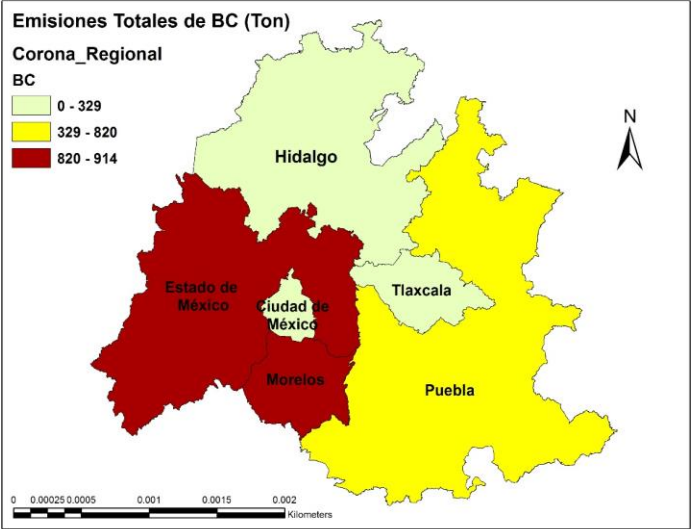
En las emisiones totales por contaminante para cada entidad federativa se observó que en los estados de Hidalgo, Tlaxcala y la Ciudad de México las emisiones fueron de un orden de magnitud menor en comparación con las emisiones de los estados de Morelos, Puebla y Estado de México (Figura 10).



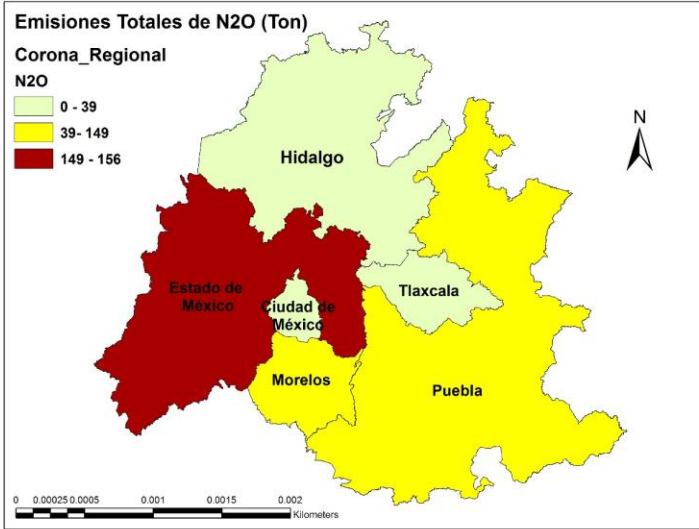
(A)



(B)



(C)



(D)

Figura 10. Mapas de emisiones totales por contaminante: CO₂ (A), CH₄ (B), BC (C), N₂O (D).

Tabla 4. Emisiones totales (en Ton/año) de la corona regional de la CDMX durante el período 2005-2014.

	CIUDAD DE MÉXICO	ESTADO DE MÉXICO	HIDALGO	MORELOS	PUEBLA	TLAXCALA
CO₂	91,921	2,208,286	471,394	2,164,063	2,026,129	775,317
CH₄	201	6,738	1,483	7,002	6,239	2,748
N₂O	9	157	32	146	150	40
BC	36	914	192	874	821	329

Por otra parte, se observó que las emisiones por tipo de cobertura presentan variaciones (Tabla 5), siendo los incendios en el tipo de cobertura agrícola los que más emiten contaminantes. Esto se puede atribuir a que en México existe una alta tasa de degradación y conversión de bosques debido al cambio de uso de suelo y a su inapropiado manejo (de Jong *et al.*, 2010).

Tabla 5. Resumen de la emisiones (Ton/año) de CO₂, CH₄, N₂O y BC durante el período 2005-2014 para cada tipo de cobertura.

COBERTURA	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	BC
PASTIZAL	490,559	1,212	62	109
BOSQUE	1,055,606	2,154	103	359
MATORRAL	420,755	618	62	320
AGRICULTURA	5,134,015	18,852	227	2,235
SELVA	8,943	28	1	3
OTRO TIPO DE VEGETACIÓN	627,235	1,549	79	140

La incertidumbre combinada para cada contaminante asociado a las distintas coberturas se determinó siguiendo la metodología propuesta por el IPCC, 2000.

La incertidumbre combinada se obtuvo con la siguiente fórmula:

$$\text{Incertidumbre combinada \%} = \sqrt{E^2 + F^2}$$

Dónde:

E^2 = es el % de la incertidumbre en los datos de actividad

F^2 = es el % de la incertidumbre en el factor de emisión

La incertidumbre más alta es para las emisiones de CO₂ y para el resto de los contaminantes la incertidumbre combinada fue del 5% (Tabla 6).

Para el cálculo de la incertidumbre en los datos de actividad solo se tomó en consideración la del sensor MODIS, ya que para los datos de carga combustible y factor de combustión no se tiene reporte de su incertidumbre asociada.

Tabla 6. Incertidumbres combinadas para cada contaminante y cobertura de vegetación usadas en el cálculo de las emisiones.

Categoría de fuente	Gas	Emisiones año base (2005)	Emisiones año t (2014)	Incertidumbre en los datos de actividad	Incertidumbre en el factor de emisión	Incertidumbre combinada
		Ton equivalente CO ₂	Ton equivalente CO ₂	%	%	%
		Datos de entrada	Datos de entrada	Datos de entrada	Datos de entrada	$\sqrt{E^2 + F^2}$
Pastizal	N ₂ O	11	1	5	0.1	5
Bosque	N ₂ O	6	0.3	5	0.15	5
Matorral	N ₂ O	8	2	5	0.18	5
Agricultura	N ₂ O	26	17	5	0	5
Selva	N ₂ O	0	0	5	0	5
Otro tipo de vegetación	N ₂ O	13	4	5	0.1	5

Categoría de fuente	Contaminante	Emisiones año base (2005)	Emisiones año t (2014)	Incertidumbre en los datos de actividad	Incertidumbre en el factor de emisión	Incertidumbre combinada
		Ton equivalente CO ₂	Ton equivalente CO ₂	%	%	%
		Datos de entrada	Datos de entrada	Datos de entrada	Datos de entrada	$\sqrt{E^2 + F^2}$
Pastizal	BC	19	3	5	0.2	5
Bosque	BC	22	1	5	0	5
Matorral	BC	41	13	5	0	5
Agricultura	BC	256	163	5	0.13	5
Selva	BC	0	0	5	0.28	5
Otro tipo de vegetación	BC	23	7	5	0.2	5

Categoría de fuente	Gas	Emisiones año base (2005)	Emisiones año t (2014)	Incertidumbre en los datos de actividad	Incertidumbre en el factor de emisión	Incertidumbre combinada
		Ton equivalente CO ₂	Ton equivalente CO ₂	%	%	%
		Datos de entrada	Datos de entrada	Datos de entrada	Datos de entrada	$\sqrt{E^2 + F^2}$
Pastizal	CO ₂	86,019	11,511	5	39	39
Bosque	CO ₂	63,874	3,362	5	37	37
Matorral	CO ₂	53,930	16,948	5	39	39
Agricultura	CO ₂	587,305	373,671	5	100	100
Selva	CO ₂	0	0	5	58	58
Otro tipo de vegetación	CO ₂	101,246	32,896	5	39	39

Categoría de fuente	Gas	Emisiones año base (2005)	Emisiones año t (2014)	Incertidumbre en los datos de actividad	Incertidumbre en el factor de emisión	Incertidumbre combinada
		Ton equivalente CO ₂	Ton equivalente CO ₂	%	%	%
		Datos de entrada	Datos de entrada	Datos de entrada	Datos de entrada	$\sqrt{E^2 + F^2}$
Pastizal	CH ₄	212	28	5	1.06	5
Bosque	CH ₄	130	7	5	0.92	5
Matorral	CH ₄	79	25	5	0.72	5
Agricultura	CH ₄	2,157	1,372	5	3.56	6
Selva	CH ₄	0	0	5	1.98	5
Otro tipo de vegetación	CH ₄	250	81	5	1.06	5

Las emisiones obtenidas por este método se presentan en comparación con un reporte reciente (INECC y Semarnat, 2015), en la tabla 7 se observa que en promedio las emisiones de gases de efecto invernadero emitidos por los incendios forestales que ocurren en la corona regional de la CDMX contribuyen con el 11% de las emisiones totales en México.

Tabla 7. Comparación de las emisiones de gases de efecto invernadero obtenidas para la corona regional de la Ciudad de México con las reportadas en el Primer Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (INECC y Semarnat, 2015). Las emisiones son reportadas en Gg de CO₂e. En la última columna se reporta el porcentaje equivalente de las emisiones en la corona regional de la Ciudad de México (CRCM) respecto a las emisiones en México para cada año (el año 2014 no se comparó porque en el informe bienal no se tiene estimaciones para ese año).

	CRCM	MÉXICO	CRCM / MÉXICO (%)
2005	982	7,800	13
2006	1,086	7,172	15
2007	603	4,473	13
2008	792	6,877	12
2009	1,673	9,158	18
2010	389	3,352	12
2011	978	32,075	3
2012	460	9,067	5
2013	1,059	9,614	11

Por otra parte se realizó la comparación de las emisiones de carbono negro del año 2013 (por ser el único año en el que se reportan emisiones de carbono negro en el primer informe bienal) con las emisiones que se tuvieron en la corona regional de la Ciudad de México para ese año (Tabla 8).

Se observó que el aporte de carbono negro de la corona regional equivale al 11% de lo que se emite en México. Esto muestra que se tiene un aporte significativo a las emisiones de carbono negro en México por incendios forestales.

Tabla 8. Comparación de las emisiones de carbono negro debido a incendios forestales sucedidos durante el año 2013 en la CRCM y en México. Se muestra el porcentaje equivalente de las emisiones en la corona con respecto a las emisiones en México.

	CRCM	MÉXICO	CRCM / MÉXICO (%)
2013	0.4	3.61	11

Los mapas generados de los incendios forestales registrados en cada año del período de estudio mostraron que el 2005, 2006, 2009, 2011 y 2013 son los años con mayor ocurrencia de incendios (Figura 11). Se observó que los lugares de ocurrencia de los incendios tenían un patrón por lo que se decidió sobreponer las líneas carreteras en cada mapa (Figura 12), dado que el cambio de uso del suelo es una de las principales causas de incendios forestales (FAO, 2000).

Se observó que las áreas de más alta ocurrencia de incendios forestales se encuentran próximas a caminos, carreteras o poblados. Esto concuerda con el modelo de ocurrencia de incendios elaborado por Cruz (2016), para el Estado de Hidalgo entre otros ejemplos citados en su tesis: Román y Martínez (2006), Carrillo *et al.* (2012) y Pérez *et al.* (2013), encontraron que la densidad de carreteras es uno de los factores antropogénicos relacionados con la incidencia, distribución y el tamaño del fuego, respectivamente, en diferentes estados de la República Mexicana.

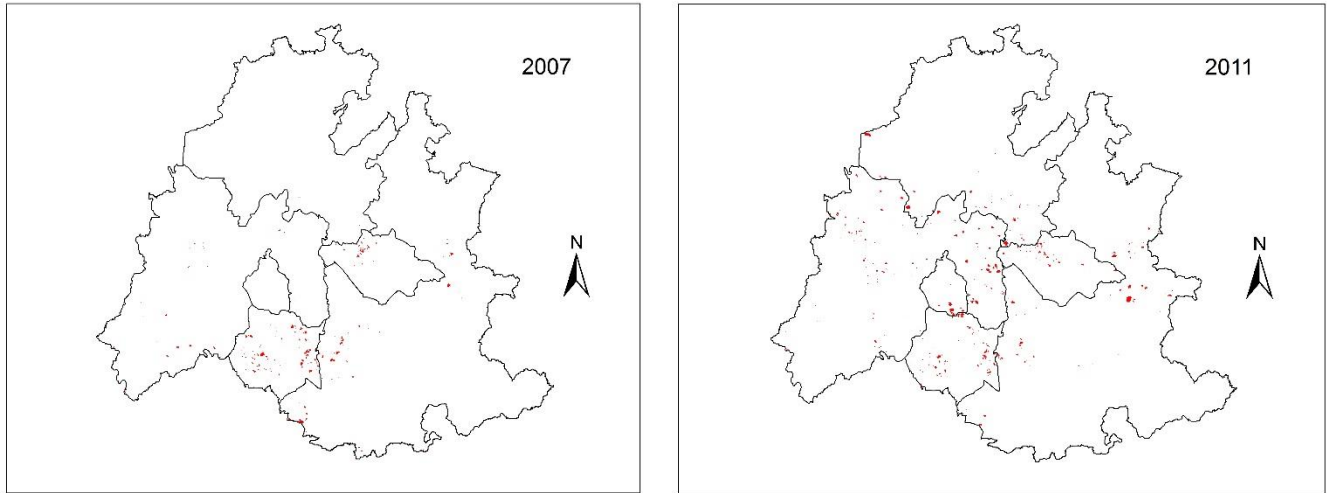


Figura 11. Áreas de superficies quemadas, comparación entre un año con menos incendios forestales (2007) con un año con más incendios forestales (2011), en la corona regional de la Ciudad de México. En los mapas solo se incluyen incendios mayores de 25ha.

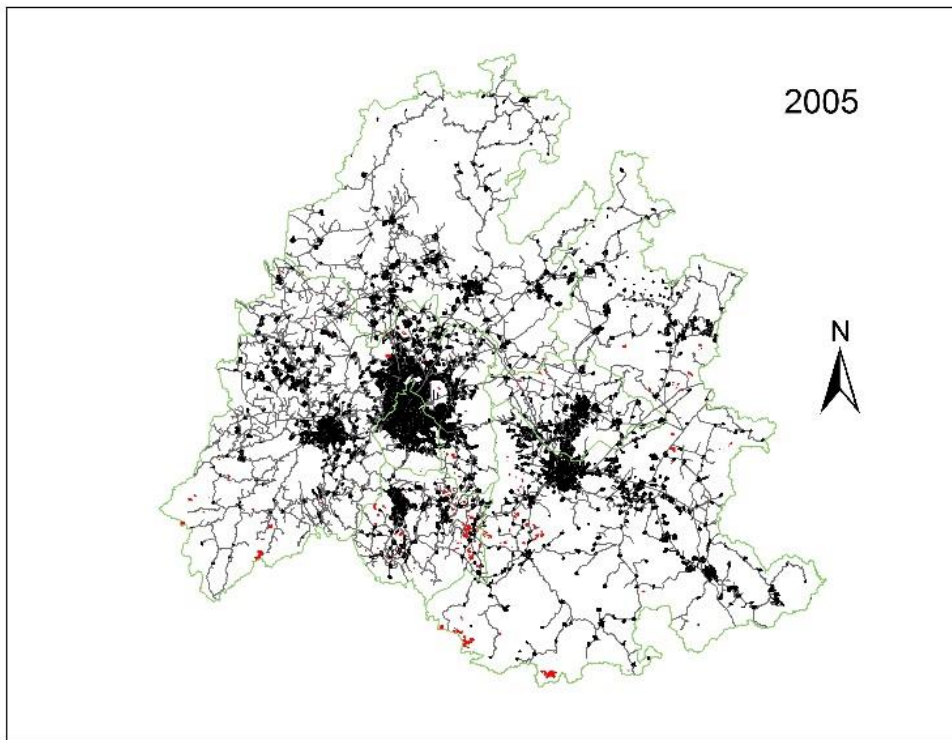


Figura 12. Ejemplo de la ocurrencia de los incendios forestales en cercanía con las líneas carreteras. Las vialidades y carreteras se presentan en negro, los incendios forestales en rojo y la división política, en verde.

Con los resultados obtenidos se decidió comprobar que la incidencia de incendios forestales en los años de estudio estuviera relacionada a la actividad humana, por lo que se utilizó una base de datos de Conafor (2005-2015) para determinarlo.

Como se muestra en la Figura 13, el 99% de los incendios forestales ocurridos durante el período de estudio, fueron ocasionados por la actividad humana. Esto coincide con los reportes de Semarnat (Semarnat, 2014).

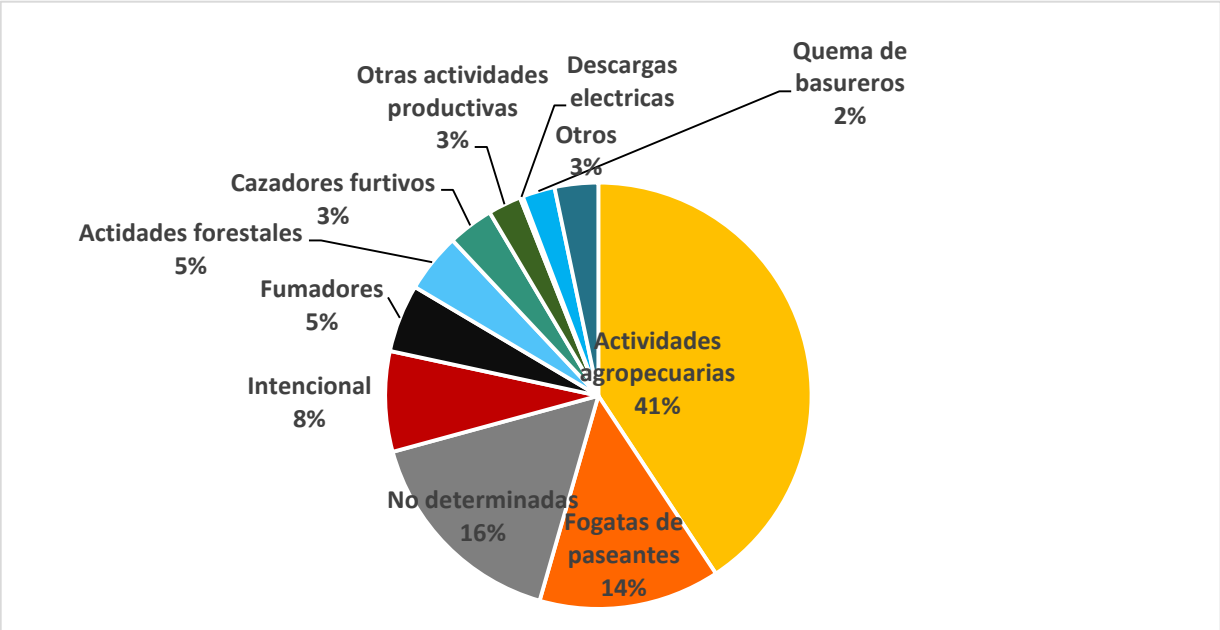


Figura 13. Principales causas de incendios forestales en el área de estudios.

Por otra parte, se decidió comprobar que los incendios detectados por el producto MODIS concordaran con los parámetros meteorológicos.

Se obtuvo que los meses en los que se presentó la mayor ocurrencia de incendios fueran de enero a mayo (Figura 14). Esto coincide con la temporada seca, tanto fría (enero) como caliente (abril-mayo) en la que la probabilidad de ocurrencia de los incendios es mayor (Cenapred, 2001).

La figura 15 presenta la relación entre el número de incendios y la precipitación promedio mensual para cada estado que conforma la corona regional de la Ciudad de México. Se observa una relación directa, a mayor precipitación menor número de incendios.

El número de incendios y el área afectada mostraron no tener relación.

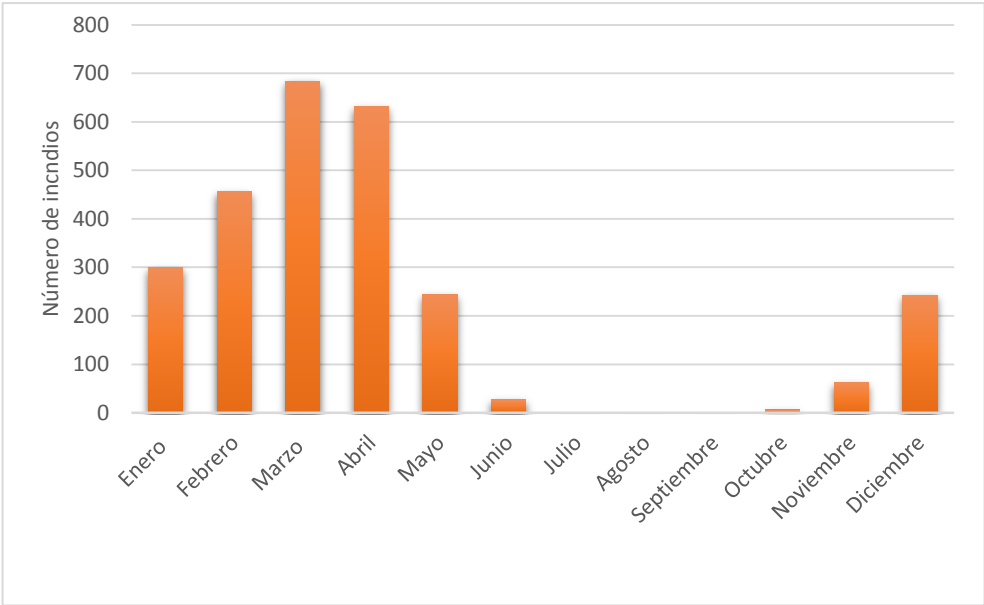


Figura 14. Promedio mensual del número de incendios ocurridos del 2005-2014.

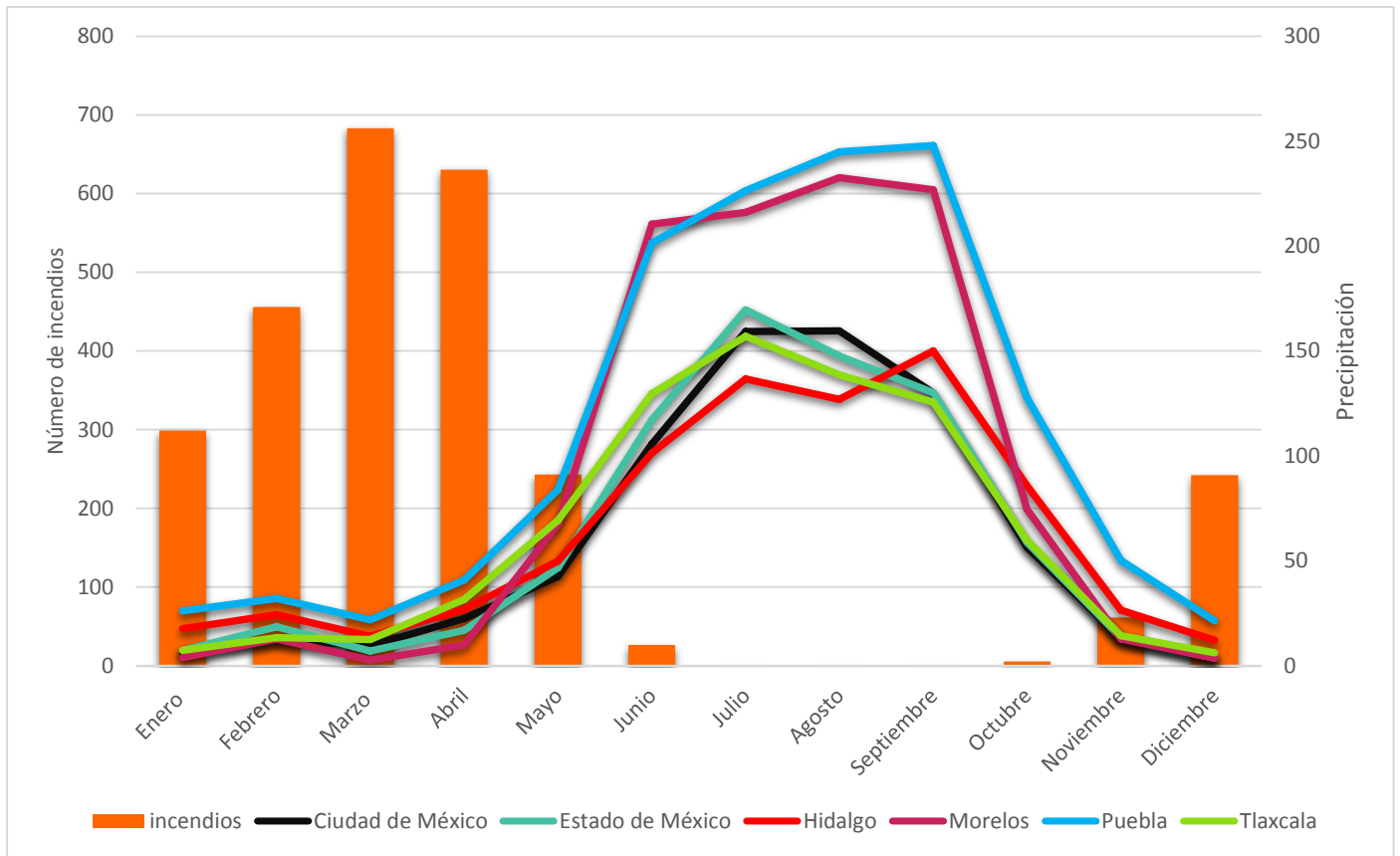


Figura15. Relación entre precipitación y número de incendios promedio mensual durante el período de estudio.

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

En los años 2009, 2013 y 2005 se presentaron la mayor cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero en la corona regional de la Ciudad de México, siendo los estados de Morelos, Puebla y el Estado de México los que presentaron más cantidad de emisiones durante el período estudiado.

El análisis de las emisiones por tipo de cobertura mostró que el tipo de cobertura agrícola es la que aporta más cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero, seguido por la cobertura de bosques.

En la comparación de las emisiones de gases de efecto invernadero y carbono negro que se tienen en la corona regional de la CDMX debido a los incendios se obtuvo que aporten, en promedio, el 11% al total nacional de emisiones.

Finalmente, se recomienda a nivel estatal como nacional se debe trabajar para mejorar la calidad y disponibilidad de la información para reducir el nivel de incertidumbre en el cálculo de las emisiones de los gases de efecto invernadero y del carbono negro producto de los incendios forestales. Se recomienda, asimismo, regular el uso de suelo para reducir las emisiones producidas por los incendios provocados, que dañan el medio ambiente, la salud y los ecosistemas.

Capítulo 6. Literatura citada

Akagi S. K., Yokelso R. J., Wiedinmyer C., Alvarado M. J., Reid J. S., Karl T., Crouse J. D. y Wennberg P. O. (2011). *Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models*. Atmos. Chem. Phys, vol. 11, 4039-4072. Doi: 10.5194/acp-11-4039-2011

Alanis H. E., Návar J. y Flores J. G. (2009). *Impacto de una quema controlada en la infiltración y el escurrimiento superficial en un bosque de pino*. En Impacto Ambiental de Incendios Forestales. Flores J. G. (coord). México: Mundi-Prensa México, S.A. de C.V. Ed. 325pp.

Andreae M. O. y Merlet P. (2001). *Emission of trace gases and aerosols from biomass burning*. Global Biogeochemical Cycles, vol. 15. No.4, 955-966.

Bachmann J., 2009. Black carbón: Ascience/policy primer. Pew Center on Global Climate Change, Arlington, VA, 45 pp.

Bautista F., Carbajal N. y Pineda L. F. (2014). *Estimation of Total Yearly CO₂ Emissions by Wildfires in Mexico during the Period 1999-2010*. Advances in Meteorology, vol. 2014. 1-8.

BBC (1998). *New smog threat as Indonesia bush fires spread*. [en línea]. <http://news.bbc.co.uk/2/hi/asia-pacific/55928.stm>

Castillo M., Pedernera P. y Peña E. (2003). *Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global*. Ambiente y Desarrollo de CIPMA, vol. 19. No. 3 y 4, 44-53 [en línea]. http://linfor.forestaluchile.cl/wp-content/uploads/2014/03/ID-05-2003-Incendios-forestes-y-M.amb_.pdf

Cedeño S. O. (1999). *Incendios forestales en México en 1998: magnitud, extensión, combate y control*. En: Incendios forestales y agropecuarios: prevención e impacto y restauración de los ecosistemas UNAM/PUMA-IPN, 1-18pp.

Cenapred (2001). *Diagnóstico de peligro e identificación de riesgos de desastres en México*. México. 219 pp [en línea]. <http://www.cenapred.unam.mx/es/DocumentosPublicos/PDF/SerieEspecial/diagnostico.pdf>

Centre for Science and Environment (CSE) (2012). *Black Carbon a Short-Lived Climate Forcer; Cannot Substitute CO₂ Mitigation Strategies*. Tughlak abad Institutional Area. New Deli, India [en línea] <http://www.cseindia.org/userfiles/Black%20Carbon%202012.pdf>

Cruz M. I., López G., Ressler R. y Colditz R. (2011). *Capítulo 6: Sistema de alerta temprana para incendios forestales en México*. En Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio. Mas J. F. (coord). México. 317pp. ISBN: 978-607-7908-55-5

Cruz-Núñez X., Villers L. y Gay C. (2014). *Black carbon and organic carbon emissions from wildfires in Mexico*. Atmósfera, vol. 27 (2). 165-172.

Cruz M. A. (2016). *Factores asociados a la ocurrencia de incendios forestales en el estado de Hidalgo*. Tesis de maestría. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo, Edo. de México, 52pp.

Delgado J. (1998). *Ciudad-Región y Transporte en el México Central*. México: Plaza y Valdés, S.A. de C.V. Ed. 221pp.

da Silva F., Pereira G., Shimabukuro Y. E. y Caria E. (2012). *Validation of MODIS MCD45A1 Product to Identify Burned Areas in Acre State- Amazon Forest*. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). 6741-6744. Doi: 10.1109/IGARSS.2012.6352558

De Jong B., Anaya C., Masera O., Olguín M., Paz F., Etchevers J., Martínez R. D., Guerrero G. y Balbontín C. (2010). *Greenhouse gas emissions between 1993 and 2002 from land-use change and forestry in Mexico*. Forest Ecology and Management, vol. 260. 1689-1701. Doi:10.1016/j.foreco.2010.08.011

EPA (2008). *National Emissions Inventory, version 2*. Technical Support Document. June 2012, DRAFT .U.S. Environmental Protection Agency. Office of Air Quality Planning and Standards. Air Quality Assessment Division. Emissions Inventory and Analysis Group. Research Triangle Park, North Carolina. 145pp.

EPA (2012). *Report to Congress on black carbon*. Environmental Protection Agency, Department of the Interior, Environment, and Related Agencies Appropriations Act, 2010, U.S. EPA-450/R-12-001. 351pp.

EPA (2016). *Black Carbon Research*. U.S. Environmental Protection Agency, [en línea]. <https://www.epa.gov/air-research/black-carbon-research>

Estrada M. O. (2006). *Sistema Nacional de protección contra los incendios forestales*. Incendios forestales. Conafor. Mundi Prensa. México. 192pp.

FAO (2000). *Bibliografía Comentada Cambios en la Cobertura Forestal*. México. [en línea]. <http://www.fao.org/docrep/006/ad667s/ad667s00.htm#TopOfPage>

FAO (2010). *Global Forest Resources Assessment 2010*. [en línea]. <http://www.fao.org/docrep/013/i1757e/i1757e.pdf>, ISBN 978-92-5-106654-6

Ferreira A. J. D., Coelho C. O. A., Ritsema C. J., Boulet A. K. y Keizer J. J. (2008). *Soil and water degradation processes in burned areas: Lessons learned from a nested approach*. Catena, vol. 74. 273-285. Doi:10.1016/j.catena.2008.05.007

Flores J. G. (2009a). *Ecología del fuego y su impacto en los ecosistemas forestales*. En Impacto Ambiental de Incendios Forestales. Flores J. G. (coord). México: Mundi-Prensa México, S.A. de C.V. Ed. 325pp.

Flores J. G. (2009b). *Aspectos generales de los incendios forestales*. En Impacto Ambiental de Incendios Forestales. Flores J. G. (coord). México: Mundi-Prensa México, S.A. de C.V. Ed. 325pp.

- Flores J. G. y Cabrera R. (2009). *Alteraciones del paisaje debido a los incendios forestales*. En Impacto Ambiental de Incendios Forestales. Flores J. G. (coord). México: Mundi-Prensa México, S.A. de C.V. Ed. 325pp.
- Flores J. G. y Gómez L. P. (2009). *Efectos del fuego sobre la calidad del aire*. En Impacto Ambiental de Incendios Forestales. Flores J. G. (coord). México: Mundi-Prensa México, S.A. de C.V. Ed. 325pp.
- Friedl M. A., Menashe D. S., Tan B., Schneider A., Ramankutty N., Sibley A. y Huang X. (2010). *MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets*. Remote Sensing of Environment, vol. 114, 168-182.
- García T. J. y Mas J.F. (2011). *Capítulo 2: Modland: los productos de superficie terrestre MODIS*. En Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio. Mas J. F. (coord). México. 317pp. ISBN: 978-607-7908-55-5
- Gordon N. (2006). *Wildfire research at NCAR, Scientists in ESSL and SERE break new ground forecasting fire and weather, assessing emissions, and understanding social impacts*. [en línea]. <https://www.ucar.edu/communications/staffnotes/0610/wildfire.shtml>
- Huang Y., Wu S. y Kaplan J. O. (2015). *Sensitivity of global wildfire occurrences to various factors in the context of global change*. Atmospheric Environment, vol. 121. 86-92. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.06.002>
- INE (2005). *Guía de elaboración y uso de inventarios de emisiones*. México. 506pp.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2015). *Primer Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. INECC/Semarnat, México.
- INEGI (2010). *Censos y conteos de población y vivienda*. [en línea]. <http://www.beta.inegi.org.mx>
- IPCC (1992). *Cambio Climático: Las evaluaciones del IPCC de 1990 y 1992*. En primer informe de evaluación del IPCC resumen general y los resúmenes para responsables de políticas y suplemento de 1992 del IPCC. Canadá. 167pp. ISBN: 0-662-02218-1
- IPCC (2000). *Chapter 6. Quantifying Uncertainties in Practice*. En Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Canadá.
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2013). *Annex III: Glossary* [Planton, S. (ed.)]. In: Climate Change 2013: The physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Langmann B., Duncan B., Textor C., Trentmann J. y van der Werf G. R. (2009). *Vegetation fire emissions and their impact on air pollution and climate*. Atmospheric Environment, vol. 43. 107-116, Doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.09.047
- Liu Y., Goodrick S. y Heilman W. (2014). *Wildland fire emissions, carbon, and climate: Wildfire-climate interaction*. Forest Ecology and Management, vol. 317. 80-96. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2013.02.020>
- Martínez M. A., Flores G. J. G. y Benavides S. J. de D. (1989). *Definición preliminar de índices de riesgo de incendios en la Sierra de Tapalpa, Jalisco*. CEFAP-Zapopan, INIFAP. SARH. Inédito.
- Martínez J., Vega-García C. y Chuvieco E. (2009). *Human-caused wildfire risk rating for prevention planning in Spain*. Journal of Environmental Management, vol. 90. 1241-1252. Doi:10.1016/j.jenvman.2008.07.005
- Molina L. y Molina M. (2002). *Air Quality in the Mexico Megacity: An Integrated Assessment*. Holanada: Kluwer Academic Publishers. 379pp. ISBN 1-4020-0452-4
- Molina M. (2009). *El cambio climático y el efecto del carbono negro*. En Taller Internacional de Carbono Negro y Cambio Climático en Latinoamérica. [en línea]. <http://www.theicct.org/sites/default/files/Molina.pdf>
- NASA (2016). *Modis Land*. USA. [en línea]. <https://modis-land.gsfc.nasa.gov/>
- Pausas J. (2012). *Incendios forestales*. Madrid, España: Catarata Ed. 119pp.
- Petrovna G. (2009). *Incendios forestales y salud humana*. En Impacto Ambiental de Incendios Forestales. Flores J. G. (coord). México: Mundi-Prensa México, S.A. de C.V. Ed. 325pp.
- Pineda N. B., Bosque J., Gómez M. y Franco R. (2010). *Exploring the driving forces behind deforestation in the state of Mexico (Mexico) using geographically weighted regression*. Applied Geography. 30. 576-591. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.05.004>
- Ramírez E. (2012). *Diagnóstico de peligro a incendios en el Corredor Biológico Chichinautzin*. Tesis de licenciatura. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco, México, 52pp.
- Rekacewicz P. (2003). *Strategic Plan for the U. S. Climate Change Science Program*. U.S.
- Santillán V., Etchevers J. D., Paz F. y Alvarado L. O. (2016). *Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de México*. Terra Latinoamericana, vol. 34. 83-96.
- Semarnat. (2014). *Coordina Gobierno Federal Prevención y Combate de Incendios Forestales*. Secretaría de medio ambiente y recursos naturales, México. [en línea]. <http://saladeprensa.semarnat.gob.mx/index.php/noticias/1521-coordina-gobierno-federal-prevencion-y-combate-de-incendios-forestales>
- Shakesby R. A. y Doerr S. H. (2006). *Wildfire as a hydrological and geomorphological agent*. Earth-Science Reviews, vol. 74. 269-307. Doi:10.1016/j.earscirev.2005.10.006

- Tsela P., Wessels K., Botai J., Archibald S., Swanepoel D., Steenkamp K. y Frost P. (2014). *Validation of the Two Standard MODIS Satellite Burned-Area Products and an Empirically-Derived Merged Product in South Africa*. Remote Sensing, vol. 6. 1275-1293. Doi: 10.3390/rs6021275
- Van Butsic., Kelly M. y Moritz M. A. (2015). *Land use and wildfire: a review of local interactions and teleconnections*. Land, vol. 4. 140-156. Doi: 10.3390/land4010140
- Villers L. y López J. (2004). *Comportamiento del fuego y evaluación del riesgo por incendios en las áreas forestales de México: un estudio en el volcán la Malinche*. En Incendios Forestales en México, métodos de evaluación. Villers L. y López J. (Eds). México. 164pp. ISBN 970-32-1843-1
- Velasco G. (2016). *Mexican forest fires and their decadal variations*. Advances in Space Research. vol. 58, 2104-2115. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2016.08.030>
- Wiedinmyer C., Quayle B., Geron C., Belote A., McKenzie D., Zhang X., O'Neill S. y Wynne K. K. (2006). *Estimating emissions from fires in North America for air quality modeling*. Atmospheric Environment, vol. 40. 3419-3432. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.02.010>
- Yakubu I., Mireku-Gyimah D. y Duker A. A. (2015) *Review of methods for modelling forest fire risk and hazard*. African Journal of Environmental Science and Technology, vol. 9(3). 155-165. Doi: 10.5897/AJEST2014.1820
- Yokelson R. J., Burling I. R., Urbanski S. P., Atlas E. L., Adachi K., Buseck P. R., Wiedinmyer C., Akagi S.K., Toohey D. W. y Wold C.E. (2011). *Trace gas and particle emissions from open biomass burning in Mexico*. Atmos. Chem. Phys., vol. 11. 6787-6808. Doi: 10.5194/acp-11-6787-2011
- Youssof H., Liousse C., Roblou L., Assamoi E.M., Salonen R.O., Maesano C. Banerjee S. y Annesi-Maesano I. (2014). *Quantifying wildfires exposure for investigating health-related effects*. Atmospheric Environment, vol. 97. 239-251. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.07.041>