



**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

POSGRADO EN CIENCIAS APLICADAS

**Emisiones Totales Anuales de CO₂ por Incendios
Forestales en el Periodo 1999-2010 en México y
Estimación de Índice de Riesgo**

Tesis que presenta

Flor Silvestre Bautista Vicente

Para obtener el grado de

Doctora en Ciencias Aplicadas

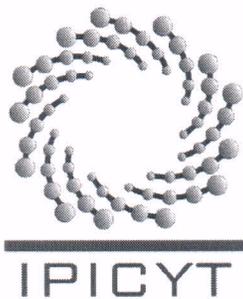
En la opción de

Geociencias Aplicadas

Directores de la Tesis:

**Dr. José Noel Carbajal Pérez
Dr. Luis Felipe Pineda Martínez**

San Luis Potosí, S.L.P. Julio de 2015



Constancia de aprobación de la tesis

La tesis ***“Emisiones Totales Anuales de CO₂ por Incendios Forestales en el Periodo 1999-2010 en México y Estimación de Índice de Riesgo”*** presentada para obtener el Grado de Doctora en Ciencias Aplicadas en la opción de Geociencias Aplicadas fue elaborada por **Flor Silvestre Bautista Vicente** y aprobada el **dieciséis de julio del dos mil quince** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Dr. José Noel Carbajal Pérez
Codirector de la tesis

Dr. Luis Felipe Pineda Martínez
Codirector de la tesis

Dr. José Tuxpan Vargas
Miembro del Comité Tutorial

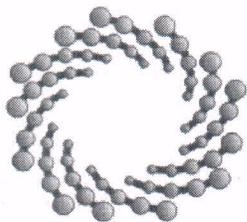
Dra. María Cristina Noyola Medrano
Miembro del Comité Tutorial



Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección del Dr. José Noel Carbajal Pérez y Dr. Luis Felipe Pineda Martínez.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia Tecnología (234461) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.



IPICYT

Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 002 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Doctorado en Ciencias Aplicadas en la opción de Geociencias Aplicadas está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 16 días del mes de julio del año 2015, se reunió a las 13:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

Dra. María Cristina Noyola Medrano	Presidenta	UASLP
Dr. José Tuxpan Vargas	Secretario	IPICYT
Dr. José Noel Carbajal Pérez	Sinodal	IPICYT
Dr. Luis Felipe Pineda Martínez	Sinodal externo	UAZ

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

**DOCTORA EN CIENCIAS APLICADAS
EN LA OPCIÓN DE GEOCIENCIAS APLICADAS**

sustentó la C.

Flor Silvestre Bautista Vicente

sobre la Tesis intitulada:

***Emisiones Totales Anuales de CO₂ por Incendios Forestales en el Periodo 1999-2010 en México
y Estimación de Índice de Riesgo***

que se desarrolló bajo la dirección de

**Dr. José Noel Carbajal Pérez
Dr. Luis Felipe Pineda Martínez (UAZ)**

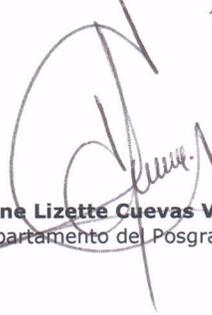
El Jurado, después de deliberar, determinó

APROBARLA

Dándose por terminado el acto a las 15:00 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición de la interesada y para los fines que a la misma convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 16 días del mes de julio de 2015.


Dr. Marcial Bonilla Marín
Secretario Académico


Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez
Jefa del Departamento del Posgrado



A Rubén y Flor

Agradecimientos

A Dios

Por darme la vida y la salud para desarrollar esta tesis.

A mi esposo: Rubén

Por su apoyo, comprensión y motivación durante el desarrollo del proyecto doctoral y de esta tesis.

A mi familia

Por acompañarme en la distancia durante el desarrollo de este trabajo.

A los directores de esta tesis:

Dr. José Noel Carvajal Pérez y Dr. Luis Felipe Pineda Martínez

Por sus ideas y aportaciones para llevar a buen término este trabajo.

Al Dr. José Alfredo Ramos Leal

Por su motivación y apoyo para ingresar al doctorado.

A mis compañeros: David Enrique y Francisco

Por el apoyo brindado en algunas dificultades técnicas.

A todas las personas que de alguna manera contribuyeron al desarrollo de este trabajo.

A CONACYT

Por otorgarme la beca durante la realización de este trabajo.

Contenido

RESUMEN	VIII
ABSTRACT	XII
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 ÁREA DE ESTUDIO	5
1.2 POBLACIÓN DE MÉXICO	6
1.3 RELIEVE Y GEOLOGÍA	6
1.3.1 <i>Península de baja California</i>	7
1.3.2 <i>El relieve de la provincia en Sonora y Sinaloa</i>	9
1.3.3 <i>La provincia de la Sierra Madre Occidental</i>	10
1.3.4 <i>La sierra Madre Oriental</i>	11
1.3.5 <i>La planicie del Noreste</i>	12
1.3.6 <i>Norte de México</i>	13
1.3.7 <i>La Mesa Central</i>	13
1.3.8 <i>Planicie costera del golfo de México</i>	14
1.3.9 <i>Sierra Madre del Sur</i>	15
1.3.10 <i>La Depresión de Balsas</i>	15
1.3.11 <i>Chiapas</i>	16
1.3.12 <i>La Depresión de Chiapas</i>	16
1.4 CLIMAS DE MÉXICO	17
1.5 TIPOS DE VEGETACIÓN	19
1.5.1 <i>Bosques</i>	19
1.5.2 <i>Matorrales</i>	20
1.5.3 <i>Pastizales</i>	20
1.5.4 <i>Selva</i>	21
1.5.5 <i>Zonas Agrícolas</i>	21
1.5.6 <i>Otros tipos de Vegetación-Pastizal</i>	22
1.5.7 <i>Otros tipos de vegetación</i>	22
a) <i>Manglar</i>	22
b) <i>Popal</i>	23
c) <i>Tular</i>	23
d) <i>Chaparral</i>	23
e) <i>Palmar</i>	23
f) <i>Sabanas</i>	24
g) <i>Vegetación de dunas costeras</i>	24
1.5.8 <i>Agrícola-Selva</i>	24
1.5.9 <i>Selva Agrícola</i>	25
1.5.10 <i>Pastizal Agrícola</i>	25
1.5.11 <i>Agrícola Pastizal</i>	25
1.5.12 <i>Selva Pastizal</i>	25
1.5.13 <i>Pastizal Selva</i>	25
CAPÍTULO 2.....	27
2.1 INCENDIOS FORESTALES	27
2.1.1 <i>Los combustibles forestales</i>	28

2.1.2 Tipos de incendios forestales.....	28
2.1.3 Topografía.....	29
2.1.4 Condiciones Meteorológicas.....	30
2.1.5 Incendios Provocados por el hombre.....	30
2.1.6 Efectos del fuego sobre la fauna forestal.....	31
2.1.7 Desaparición de hábitats, territorios y cobijo.....	32
2.1.8 Pérdida de alimentos.....	32
2.1.9 Perdidas económicas.....	33
2.2 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA PRODUCIDA POR INCENDIOS FORESTALES.....	33
2.2.1 Importancia del CO ₂ en la atmosfera.....	35
2.2.2 El metano (CH ₄).....	36
2.2.3 Importancia del CO.....	38
2.3 EFECTO EN LA POBLACIÓN HUMANA.....	38
2.4 INCENDIOS FORESTALES EN MÉXICO.....	39
2.4.1 Monitoreo de incendios forestales en México.....	40
2.4.2 Detección de incendios.....	41
2.4.3 Validación en la detección de puntos de calor.....	42
2.5 CONTAMINACIÓN DEL AIRE POR INCENDIOS FORESTALES EN MÉXICO.....	43
2.5.1 Justificación.....	44
2.5.2 Objetivos.....	44
CAPÍTULO 3.....	46
MATERIALES Y METODOLOGÍAS APLICADAS EN ESTE TRABAJO.....	46
3.1 MATERIALES.....	46
3.2 MODELO DE DISPERSIÓN WRF.....	48
3.3 ARW SOLVER Y POST PROCESAMIENTOS Y HERRAMIENTAS DE VISUALIZACIÓN.....	50
3.4 MODELO WRF_CHEM.....	50
3.4.1 Aplicaciones en el sistema de modelación con el WRF-CHEM.....	51
3.5 MÉTODO DE ESTIMACIÓN DE LOS CONTAMINANTES CO ₂ , CO Y CH ₄	52
3.6 METODOLOGÍA PARA CONSTRUIR EL MAPA DE RIESGO DE EMISIONES DE CO ₂ Y FRECUENCIAS DE INCENDIOS.....	54
3.7 METODOLOGÍA DE LA MODELACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE HUMO PRODUCIDO POR INCENDIOS FORESTALES EN LA CELDA DE MAYOR EMISIÓN.....	54
CAPÍTULO 4.....	57
4.1 ESTIMACIÓN DE EMISIONES.....	57
4.2 ÁREA QUEMADA.....	61
4.3 ESTIMACIÓN DE LAS EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO.....	64
4.4 PORCENTAJE DE EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO POR TIPO DE VEGETACIÓN.....	67
4.5 ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE MONÓXIDO DE CARBONO.....	69
4.6 ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE METANO.....	71
4.7 EMISIONES TOTALES DE CO ₂ , CO Y CH ₄	73
4.8 ÍNDICE DE RIESGO DE EMISIONES DE CO ₂ EN MÉXICO.....	75
4.9 MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA DISPERSIÓN DE CO EN LA REGIÓN MÁS CRÍTICA DE EMISIONES DE CONTAMINANTES.....	77
4.10 FRECUENCIA DE INCENDIOS FORESTALES EN MÉXICO.....	82
4.11 CONSUMO DE LA VEGETACIÓN EXISTENTE.....	84
CAPÍTULO 5.....	89
CONCLUSIONES.....	89
REFERENCIAS.....	91
ANEXO I.....	97

ANEXO II.....	108
ARTÍCULO PUBLICADO.....	108

Lista de Tabla

Tabla 3.1. Carga de biomasa y eficiencia de quema.....	48
---------------------------------------------------------------	-----------

Tabla 4.1. Comparación de emisiones estimadas por quema de biomasa.....	74
--------------------------------------------------------------------------------	-----------

Lista de Figuras

Figura 1.1. Principales provincias orográficas donde ocurren gran cantidad de incendios forestales.....	5
Figura 1.2. Relieve de México. Datos tomados de CONABIO.....	7
Figura 1.3. Climas de México. Datos por CONABIO.....	18
Figura 1. 4. Tipos de Vegetación de México. Datos por CONABIO.....	26
Figura 2.1. Incendio forestal. NASA, 2006.....	32
Figura 2.2. Incendios forestales y contaminación atmosférica.....	33
Figura 2.3. Incendios forestales y áreas afectadas en México documentados por la CONAFOR.....	39
Figura 2.4. Puntos de calor de 1999 a 2010: Datos fuente: CONABIO.....	42
Figura 3.2. Número de puntos de calor para 1999-2010. Datos de CONABIO.....	47
Figura 3.3. Tipos de vegetación de México. Datos por INEGI, 2005.....	47
Figura 3.4. Sistema de modelación con el WRF (WRF, 2014.....	49
Figura 3.5. Flujos de datos con el programa de WPS (ARW-2014).....	50
Figura 3.6. Pasos para realizar la modelación con el WRF-CHEM.....	56
Figura 4.1. Polígono de los tipos de vegetación en México. Datos por INEGI, 2005.....	59
Figura 4.2.a) Puntos de calor en cada área de vegetación y b) puntos de calor por tipo de vegetación.....	60
Figura 4.3. a) Área promedio quemada. b) área total anual quemada.....	62

Figura 4.4. Distribución geográfica de las emisiones anuales de CO ₂ producida por incendios forestales ocurridos durante el período 1999.....	65
Figura 4.5. Porcentajes de emisión de CO ₂ por cada tipo de vegetación.....	67
Figura 4.6. Distribución de emisiones totales anuales de CO por incendios forestales en México durante 1999-2010.....	69
Figura 4.7. Distribución de las emisiones de Metano por incendios forestales en México.....	72
Figura 4.8. Emisiones totales anuales de a) CO ₂ , b) CO, c) H ₄	73
Figura 4.9. a) Índice de riesgo de emisiones de CO ₂ producido por incendios forestales. b) Trayectoria de huracanes desde 1999-2010.Datos por CENAPRED.....	75
Figura .4.10. a). Imagen satelital y pluma de humo. b) modelación de la dispersión de CO en la región de máxima emisión.....	78
Figura 4.11. Altura de la pluma de humo en la zona de simulación.....	79
Figura 4.12. Presenta los valores de temperatura y dirección de los vientos en el dominio de simulación a la hora 19 del día 19 de marzo del año 2003.....	82
Figura 4.13. Frecuencias de incendios forestales en México 1999.2010.....	83
Figura 4.14. a) Cantidad de Biomasa por superficie en cada tipo de vegetación. b) Carga de biomasa en cada tipo de vegetación.....	85
Figura 4.15 a) Biomasa total y biomasa quemada; b) biomasa en existencia y c) tiempo de consumo de la biomasa existente.....	87

Resumen

En las últimas décadas el fuego en los ecosistemas se ha convertido en una fuente emisora de grandes cantidades de contaminantes que impactan el sistema atmosférico. Estos impactos se reflejan en la mala calidad del aire local y regional, y planteando un riesgo directo más severo a los humanos y animales que habitan en lugares con altas frecuencias de incendios. En México, los episodios de incendios forestales documentados alcanzan un número de hasta 15,000 incendios por año y un área afectada de hasta 8000 km². Estos eventos inciden predominantemente en la Sierra Madre Occidental, Sierra Madre Oriental, Sierra Madre del Sur y en la Península de Yucatán y al Sur de México. Pero los incendios forestales afectan prácticamente a todos los ecosistemas del País devastando extensas zonas de diferentes tipos de vegetación. En este trabajo se efectuaron estadísticas sobre los incendios forestales detectados por satélite, denominados puntos de calor. Este número es mucho mayor que los incendios documentados por la CONAFOR. En esencia se estimaron los polígonos a nivel nacional de los tipos de vegetación más importantes. Se estimaron promedios anuales de áreas afectadas por los incendios. Usando las cantidades de biomasa por km² para cada tipo de vegetación y una metodología conocida se calcularon las emisiones a la atmósfera de los contaminantes que más predominan en las emisiones por incendios forestales; el Dióxido de carbono CO₂, Metano (CH₄) y Monóxido de Carbono (CO). Estos contaminantes favorecen la formación de niebla tóxica y favorecen la contaminación atmosférica. La estimación se hizo para 12 años consecutivo desde 1999 hasta el año 2010, aprovechando el avance de las herramientas computacionales y la información obtenidas de imágenes de satélite datos de literatura científica y estadísticas de incendios forestales.

Además del cálculo de la cantidad de dióxido de carbono (CO₂), Metano (CH₄) y Monóxido de carbono (CO) liberado a la atmósfera en el periodo 1999-2010 en México. También se calculó un índice de riesgo de emisiones de CO₂ con finalidad de conocer las zonas con más riesgos de emisiones de CO₂ debido a incendios

forestales. La región con alto niveles de emisión de CO₂ se localizan en la península de Yucatán y en las Sierras Madre de México. Las emisiones generadas por incendios que ocurren esa región impactan la calidad del aire de la zona de Campeche, Yucatán y Quintana Roo. Se realizó un mapa de frecuencia en el cual se muestra las zonas con alto número de incendios para todo el periodo que se consideró. Las coberturas vegetales con mayor número de incendios forestales son las regiones de selva, bosque, matorrales y pastizales. Aplicando la modelación numérica, se pudo estimar el alcance de contaminación atmosférica de la celda con la mayor cantidad de emisiones. Esta celda fue determinada en base a los dato del periodo 1999-2010. Durante este período México ha emitido a la atmosfera la cantidad aproximada de 112 Tg de CO₂, 5.8 Tg de CO y 1.2 Tg de CH₄. Con este trabajo se tiene una idea cuantitativa de estos contaminantes.

Estos resultados muestran que los ecosistemas de México son altamente afectados por incendios forestales. Con el ritmo de incidencia calculado para el periodo analizado sobre los ecosistemas mexicanos en algunos cientos de años la vegetación que existía hasta el 2010 puede ya estar más fragmentada y se tendría vegetación de renuevo. Estos procesos en los ecosistemas alteraría el sistema climático a nivel local, regional y Global.

Abstract

In the last decades, fires in ecological systems became a source of huge quantities of contaminants that deteriorate the atmospheric air quality. This air deterioration causes a negative impact on the life conditions at local and regional level of humans and animals. The number of documented wildfires reaches in Mexico a value of about 15 000 per year with about 8000 km² of affected areas. These wildfire events occur dominantly in the Western Sierra Madre, Eastern Sierra Madre, South Sierra Madre and in the Yucatán Peninsula. The statistics reveal that wildfires occur practically in all ecosystems of the Mexican territory devastating extensive areas of vegetation. In this research work, a statistical study on forest fires detected by satellite (hot spots) was carried out. It is important to mention that the number of hot spots is much larger than the number of documented wildfires by CONAFOR. Basically, the polygons of the most important vegetation types were determined for the whole territory. From the documented wildfire yearly means of affected areas were calculated. Further, using values of the quantity of biomass per square kilometer of every vegetation type, the emissions of aerosols to the atmosphere were estimated. Applying a known methodology, the emissions of the most important greenhouse effect gases (CO₂, CO, CH₄) were estimated. These contaminants favor the formation of toxic clouds and increase the atmospheric pollution. The estimations were carried out for a period of 12 years, from 1999 to 2010. The results allowed calculating a risk index for the CO₂ emissions by wildfires. In this way, it was possible to know which regions of Mexico are more impacted by the high concentrations of pollutants (CO₂, CO, CH₄). The region with the highest concentration levels was the Yucatán Peninsula, the Western Sierra Madre and the South Sierra Madre. A frequency map about the incidence of forest fires was also calculated. It was possible to identify the regions where a lot of wildfires occur. The vegetation cover types with a large number of fires were rainforest, forest, shrub and grass. Applying the model WRF to simulate the dispersion of aerosols emitted by the cell with the largest CO₂ emissions was possible to determine the area of influence of wildfires in the Yucatán Peninsula.

During the period 1999-2010, the emissions to the atmosphere in Mexico by wildfires reached a value of 112 Tg of CO₂, 5.8 Tg of CO and 1.2 Tg of CH₄. These results give a quantitative idea of the pollution caused by wildfires. The rate of vegetation consumptions is another aspect to be considered. This research work shows that, at the calculated consumption rates, in a few centuries some vegetation type could be completely exhausted. Wildfires also affect the local and regional climate conditions and contribute to the climate change.

CAPÍTULO 1

Introducción

La cubierta vegetal es una importante riqueza de un país. Bosques templados, selva tropical, pastizal, matorral, agricultura y otros tipos de vegetación contribuyen directa e indirectamente al bienestar de una nación. En principio, esta vegetación de invaluable riqueza está siendo destruida y renovada continuamente por causas naturales y antropogénicas. En un contexto más general, la biósfera y la antropósfera parecen interactuar sin esperanza alguna en lo que parece una competencia desigual, con la antropósfera ocupando cada vez más áreas de la biósfera. Amenazada por causas naturales y antropogénicas, la biósfera parece declinar irremediablemente. Factores importantes son la creciente población mundial que requiere tierra para los asentamientos humanos y la industria maderera y derivados. Otro factor relevante para el deterioro de la cobertura vegetal es la quema de biomasa por incendios forestales. Aunque el papel jugado por los incendios forestales en determinar los tipos de vegetación es ambivalente debido a que los incendios son esenciales para mantener la dinámica en los ecosistemas, la biodiversidad y la productividad, el hecho es que alrededor del 90 % de los incendios es de origen antropogénico. Claramente, el proceso de la ocurrencia de incendios y renovación de la vegetación está viciado por las acciones antropogénicas las cuales favorecen el declive de la cobertura vegetal con un aumento sin control del cambio de uso de suelo. Esto ha sido reportado por el Management Global Assessment (Evaluación Global de Gestión) 2006 (FAO, 2006). Una indicación de la severidad en los niveles de deforestación por incendios forestales es el valor aproximadamente de 3.5×10^6 km² de áreas afectadas en todo el mundo en el año 2000. En el periodo de 2000-2004, un área de 4.1×10^4 km² fue devastada por incendios forestales. En Europa ocurrieron alrededor de 9500 incendios forestales entre 2000 y 2005 en 23 países con un área quemada promedio por año de 6000 km² (Barbosa *et al*, 2009). Las áreas afectadas por incendios forestales en Australia y Asia alcanzaron valores de cientos de miles de kilómetros cuadrados. Mientras que en África, las áreas

afectadas por los incendios alcanzaron millones de kilómetros cuadrados. De acuerdo con la (FAO *et al.*, 2001), las tasas más altas de deforestación ocurrieron en Latinoamérica, África y Asia. En Brasil, la deforestación por incendios forestales alcanzó durante los años 1990 una tasa promedio de 23170 km²/año y en México de alrededor de 6460 km²/año. En México, la cobertura vegetal alcanzó en 2010 aproximadamente el 71 % (~ 1.4x10⁶ km²) del país. Con estas tasas de deforestación y sin consideración de programas de reforestación, las reservas forestales habrían sido consumidas y la cobertura vegetal desaparecería en 216 años. Esto da una idea de la gravedad del problema. Tasas similares de deforestación pueden ser encontradas para otros países o regiones del mundo. Finalmente, aunque una reducción promedio en las tasa de deforestación global de 8.3x10⁴ km²/año (periodo 1990-2000) a 5.1x10⁴ km²/año, ha sido observada en el periodo de 2000-2010, las áreas deforestadas son aún muy grandes (FAO, 2010).

El fuego es un proceso natural que desempeña un papel importante en el medio ambiente, así como en el mantenimiento de la biodiversidad en todo el planeta. Su función natural determina la distribución de los hábitats, el flujo del carbono, nutrientes, propiedades de retención del agua en suelos y hábitats adaptados al fuego y dependientes del mismo para su salud ecológica (The Nature Conservancy, 2007). En las últimas décadas el uso del fuego en las actividades humanas ha alterado su función y frecuencia natural.

El uso del fuego en algunos ecosistemas no adaptados al fuego han propiciado que se liberen cantidades inaceptables de gases de efecto invernadero a la atmósfera, alterando la hidrología del paisaje, perjudicando la calidad del aire local y regional, y planteando un riesgo directo más severo a las viviendas humanas y salud de las personas que habitan en lugares con altas frecuencias de incendios. Algunos estudios indican que a largo plazo, los incendios de origen humano aceleran la tendencia de transformaciones de los ecosistema causada por el cambio climático (The Nature Conservancy, 2007).

La quema de biomasa que en su mayoría son de origen antropogénico (Levine *et al.*, 1999) afectan principalmente los ecosistemas forestales de países tropicales

(Cochrane, 2003; Levine *et al.*, 1999; Skinner y Chang, 1996). La República Mexicana por su situación geográfica, su forma, clima, orografía, geología y suelo, presenta una gran diversidad de condiciones ecológicas que en primera magnitud favorecen la presencia de incendios forestales cada año (Sorukhán *et al.*, 2009; Dávila y Sosa, 1994).

Los episodios de incendios forestales en México ocurren en un número de hasta 15,000 incendios por año y afecta hasta 8000 km² de superficie. Estos eventos inciden sobre todo en la Sierra Madre Oriental y al Sur de México. Los factores que favorecen la ignición en la vegetación son varios, desde una época de sequía hasta las actividades antropogénicas (Mc Phaden, 2002). Los incendios forestales en la República de México afectan principalmente en la época de enero-mayo de cada año. Estos incendios, devastan extensas áreas de cubierta vegetal y ocasionan diversos problemas ambientales como la contaminación atmosférica (Villers-Ruiz y López-Blanco, 2004).

Existe amplia información acerca de que los gases producidos por incendios forestales son precursores del efecto invernadero y del calentamiento global. El humo generado durante incendios forestales altera los ciclos geoquímicos que existen de manera natural en la atmósfera y la calidad del aire en las regiones que se queman frecuentemente (Levine *et al.*, 2000; Cochrane, 2001 y Contreras-Moctezuma *et al.*, 2003).

Varios estudios reportan que las sustancias que más predominan durante un incendio forestal es: dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) y vapor de agua (Lobert *et al.*, 1991; Nicholas *et al.*, 2006; Dale *et al.*, 1994 y Contreras-Moctezuma *et al.*, 2003). Estos contaminantes favorecen la formación de niebla toxica y que a su vez; afecta la visibilidad y la salud de las personas que se exponen a las emisiones en zonas cercanas a regiones con incendios frecuentes. Además de los efectos locales, los contaminantes producido durante un incendio forestal, debido a la circulación atmosférica, pueden dispersarse a grandes distancias y afectar más áreas (Damoah *et al.*, 2004). En este sentido, la quema de biomasa tiene implicaciones a nivel mundial.

Cuantificar los contaminantes emitidos a la atmósfera por incendios forestales es complejo debido a los diversos factores que intervienen en la ignición como son carga de combustible forestal, tipo de vegetación quemada, eficiencia de quema y área quemada. Estos datos no siempre están disponibles, por lo que es necesario recurrir a registros históricos, imágenes de satélite, estudios en laboratorio o mediciones en campo (Levine *et al.*, 2000; Levine *et al.*, 1999 y Lazaridis *et al.*, 2008).

Con herramientas computacionales y la información obtenidas de imágenes de satélite fue posible hacer una estimación de la cantidad de contaminantes que se ha emitido en México durante 1999-2010. Para la estimación se consideró datos de literatura científica, registros históricos de incendios forestales y datos de imagen satelital. Se calculó la cantidad de dióxido de carbono (CO_2), Metano (CH_4) y Monóxido de carbono (CO) liberado a la atmósfera en el periodo 1999-2010 en México.

También, se realizó el cálculo del índice de riesgo de emisiones de CO_2 con finalidad de establecer las zonas con mayor riesgo de contaminación ocasionada por incendios forestales. Se generó un mapa de frecuencias en el cual se muestra las zonas con alto número de incendios desde 1999-2010. Adicionalmente, se utilizó el modelo Numérico (el WRF) para estimar un caso de dispersión de aerosoles durante la quema de biomasa en la zona con más incendio, para tener más información de las concentraciones de los contaminantes durante un evento. Los resultados presentados motivan a seguir estudiando la problemática que son los incendios forestales.

En esta tesis los resultados viene a ser el primer aporte a nivel nacional a cerca de la cantidad de contaminantes que son emitidos a la atmosfera cada año en la época de mayor ocurrencia de incendios.

1.1 Área de estudio

México tiene una topografía muy compleja con cadenas montañosas ocupando la mayor parte del país y una amplia variedad de tipos de vegetación, con regiones inaccesibles ocupadas por bosques desde templados a selva tropical y una gran extensión de territorio con zonas semidesérticas (**Figura 1.1**). En esta complejidad de orografía y vegetación ocurren gran cantidad de incendios forestales. Por este motivo se hace una breve descripción de las principales características orográficas y de vegetación de México.

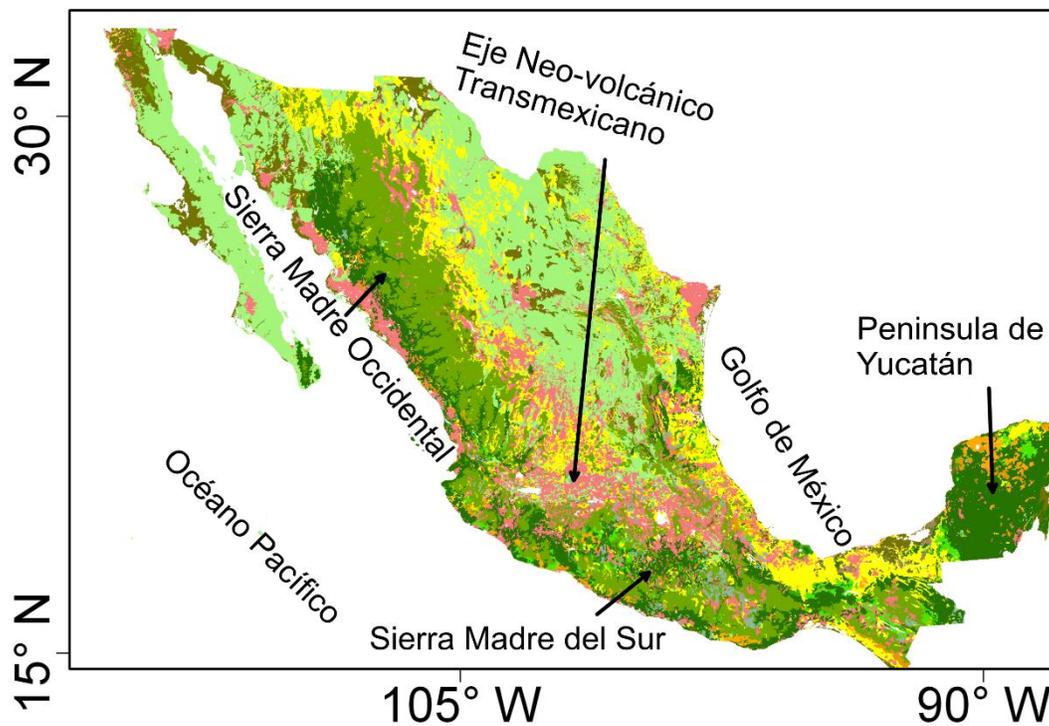


Figura 1.1. Principales provincias orográficas donde ocurren gran cantidad de incendios forestales.

México se extiende entre la latitud de 14° 32' 27" en la desembocadura del río Suchiate y la latitud de 32° 43' 06" que pasa por la confluencia del río Gila con el río Colorado. En su totalidad, el país está integrado por entidades federativas; islas, arrecifes y cayos en los mares adyacentes; un buen número de islas como

Guadalupe y Benito Juárez; la plataforma continental y los zócalos submarinos; las aguas de los mares territoriales y los mares interiores y el espacio aéreo situado sobre el territorio nacional. La superficie total de México (tierra y mar) supera los cinco millones de kilómetros cuadrados distribuidos en 1.9 millones de Kilómetros cuadrados de superficie continental, 5 127 kilómetros cuadrados de superficie insular y 3.1 millones de kilómetros cuadrados de Zona Económica Exclusiva (INEGI, 2013).

1.2 Población de México

La incidencia de incendios forestales con su gran cantidad de contaminantes emitidos a la atmósfera puede afectar a importantes zonas urbanas. De acuerdo al Censo de Población y Vivienda 2010 en la superficie de las 31 entidades federativas y el distrito federal, habitan un número total de 112 337 de habitantes. La de mayor densidad de población es el estado de México con 16,6 millones de habitantes (14% de la población total del país) y la menos poblada es Colima con 711 000 habitantes (0,59 % de la población total del país) (CONAPO, 2014 e INEGI, 2014). Es importante señalar que muchos núcleos urbanos se ven afectados recurrentemente por el deterioro de la calidad del aire siendo mayor el impacto en zonas con mayor densidad de población.

1.3 Relieve y geología

El relieve de La República Mexicana se caracteriza por tener sistemas montañosos, altiplanos, cuencas entre las montañas y planicies costeras (**Figura 1.2**). La altitud sobre el nivel medio del mar determina en buena medida la variabilidad observada en tipos de vegetación. El tipo de vegetación determina la cantidad de biomasa y en incendios forestales la cantidad de biomasa quemada. Finalmente, la biomasa quemada determina también la cantidad de contaminantes emitidos a la atmósfera.

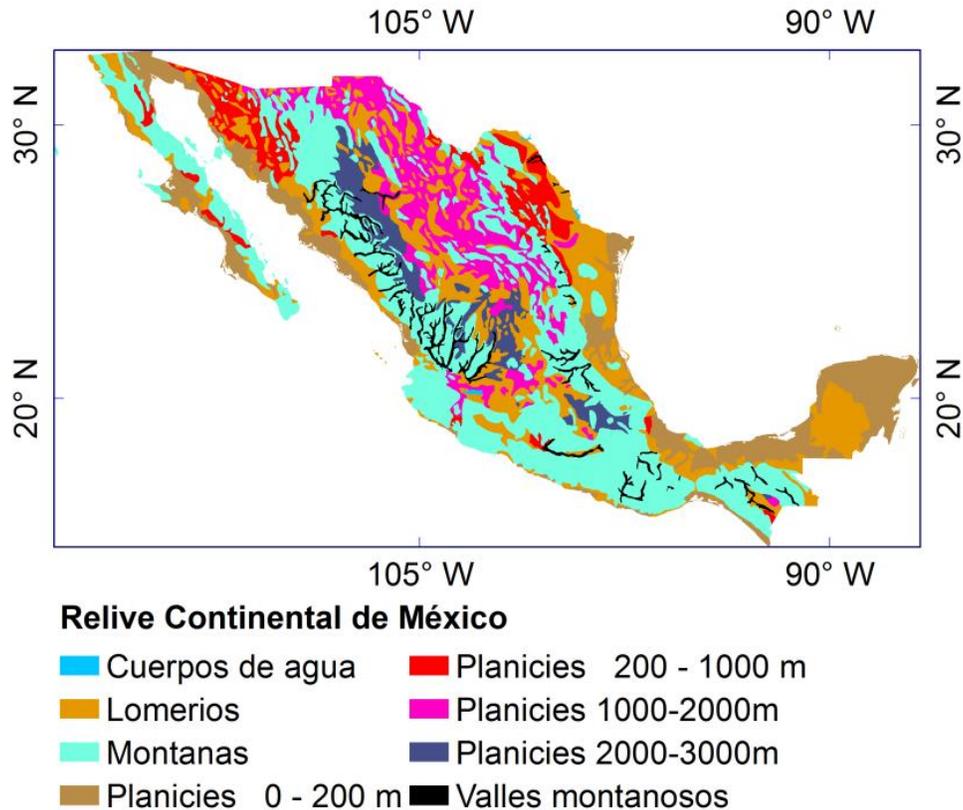


Figura 1.2. Relieve de México. Datos tomados de CONABIO.

En base a la actual clasificación de provincias fisiográficas se mencionan las más importantes de acuerdo a Lugo-Hubp (1990).

La Geología de México contiene gran diversidad de formaciones geológicas por estar en una zona donde hay gran actividad tectónica. El país está al límite de la placa norteamericana, donde esta placa crea una zona de subducción con la placa de cocos en el océano pacífico. También, forma parte del cinturón de fuego del pacífico, formando zonas de expansión en los límites de la placa norteamericana y del Pacífico. En este apartado se mencionan las principales divisiones geológicas de México de acuerdo a INEGI, (2013).

1.3.1 Península de baja California, esta estructura se extiende con una orientación Noroeste-Sureste, aproximadamente 1200 km, y su superficie total es del orden de 170,000 km², la anchura de la misma varia de 40 a 225 km y está limitada por las aguas del pacifico. Entre los extremos septentrional y meridional

de la península, predomina el relieve montañoso. En el norte de la península, se extiende un conjunto de montañas, continuación de la Sierra Nevada de los estados Unidos de América. La escasez de agua crea condiciones para la incidencia de incendios forestales.

La geología de Baja California Norte distingue diferentes unidades y se puede clasificar según tres cinturones pre- terciarios que corren a lo largo de la península. Estos cinturones se encuentran cubiertos de manera independiente por cuerpos volcánicos y depósitos sedimentarios del Terciario y Cuaternario. El primer cinturón, se localiza al extremo occidental de la península y consiste de estratos subhorizontales de arenisca, limolitas, lutitas y conglomerados de fósiles marinos como los huesos de saurios. El siguiente cinturón está ubicado al este del primer cinturón, lo constituyen secuencias de rocas volcánicas, volcanoclásticas y sedimentarias cuya edad corresponde al cretácico inferior.

El tercer cinturón se ubica al borde oriental de la península de Baja California y está constituido de afloramientos complejos de rocas intrusivas y rocas metamórficas. Por otra parte, en el interior de la península se han acumulado en estas épocas depósitos aluviales, eólicos y lacustres.

En Baja California Sur se encuentra la Sierra de la Giganta. Esta estructura está constituida por imponentes secuencias de rocas piroclásticas, derrames lávicos y areniscas continentales que alcanzan en conjunto hasta 1200 m de espesor. Los afloramientos de esta secuencia son persistentes en la mayor parte de la mitad oriental de la porción sur de la península. Las cuencas de Vizcaíno y Ballenas-Iray Magdalena abarcan la mitad occidental del Estado de Baja California Sur y están representadas por zonas de topografía suave en donde se encuentran expuestas secuencias cuyo rango genocronológico varía desde el Triásico hasta el reciente. Estructuralmente estas zonas constituyen dos grandes depresiones en forma de sinclinal, de orientación general noroeste-sureste, conformadas por rocas cretácicas y cenozoicas. En el área de la Bahía Magdalena existen conjunto petrográficos mesozoicos intrincado de terrenos con afinidad oceánica y de arco

volcánico. La secuencia más antigua de la región está constituida, por rocas sedimentarias triásicas de la península de Vizcaíno.

Finalmente la región de Cabo está formada por un macizo batolítico que se expresa en forma de complejo montañoso el cual es interrumpido en la parte central por la depresión del Valle de Santiago y en la parte norte por el Valle de la Ventana. El batolito que constituye esta zona montañosa está integrado por granodioritas y granitos. Los bordes rectilíneos de esta zona sugieren fallas de gran desplazamiento que se elevan por encima del nivel del área de los afloramientos cenozoicos.

1.3.2 El relieve de la provincia en Sonora y Sinaloa predomina una planicie aluvial y de pie de monte, sobre la que se asientan montañas. Estas son menores en superficies y altitud hacia las costas y van aumentando hacia el oriente. Se reconocen cuatro unidades principales en su relieve: El desierto de Altar, planicie aluvial y de pie de monte, las cadenas montañosas de bloque transicionales a la Sierra Madre Occidental y el campo volcánico cuaternario El Pinacate. El clima de árido a semiárido es favorable a que los incendios forestales sean un problema ambiental en tiempos de estiaje.

En el aspecto geológico se distingue la región del Desierto Sonorense. Las montañas complejas que constituyen esta región se conforman por terrenos preterciarios que son cubiertas hacia el este por los cuerpos volcánicos cenozoicos que forman la Sierra Madre Occidental. En el estado de Sonora afloran unidades de roca con un rango geocronológico que varían desde el precámbrico hasta el reciente. También es importante mencionar que en Sonora y Sinaloa se observan afloramientos rocosos debido a lo intrincado de las estructuras que se encuentran conformando el paisaje geológico marcados por límites topográficos naturales.

Otra importante zona geológica es la Llanura Costera del Pacífico. Esta región se caracteriza por la evolución de un sistema de deltas que han avanzado

paulatinamente hacia el oeste. Estas deltas se han formado por la desembocaduras de los ríos Mayo, Fuerte, Sinaloa, Culiacán, San Lorenzo y Mocorito y han vuelto prominencias rocosas que formaban islas antiguas. La zona está limitada al oeste por un litoral con desarrollo de acumulaciones arenosas, producto de la acción de las corrientes litorales. El borde oriental de esta zona está constituido por las estribaciones de la Sierra Madre Occidental en donde aparece un conjunto de Sierras formadas por unidades rocosas, cuyo rango geocronológico varía del precámbrico al terciario inferior.

Las rocas más antiguas que afloran en los estados de Sinaloa son aquellas que se encuentran en los afloramientos metamórficos de la Sierra de San Francisco al norte de los Mochis. Las unidades consisten de intercalaciones de gneises de moscovita y biotita con anfibolitas e intrusiones de cuerpos de gabro y granodiorita y se observan desarrollos de pegmatitas y migmatitas.

A lo largo del borde oriental de la Llanura Costera del Pacífico existen una serie de afloramientos aislados de regular extensión de secuencias paleozoicas marinas. Estas secuencias están constituidas por areniscas, lutitas, limolitas y calizas en algunas localidades se presentan afectadas por diversos grados de metamorfismo. Estos terrenos metamórficos constituyen al basamento sobre el cual se desarrollaron episodios de sedimentación marina de ambiente de plataforma, ocurridos afinales del Precámbrico y durante el Paleozoico.

1.3.3 La provincia de la Sierra Madre Occidental tiene dimensiones aproximadas de 1400 km de longitud, por 120 a 300 km de anchura, con alturas medias de 2100 a 2200 m.s.n.m. En algunas regiones supera los 3000 m.s.n.m y ocupa una superficie aproximada de 250000 km². La disposición geográfica y tectónica se asocia al golfo de California y a la Sierra Madre Oriental, al Altiplano, a la provincia de Sierras y Valles y al Sistema Neo volcánico Transmexicano. La planicie costera del Occidente es una provincia deltaica originada por los ríos principales: Mayo, Fuerte y Yaqui, marginal a la Sierra Madre Occidental. Provincias Sierras y Valles se sitúan entre la Sierra Madre Occidental y la Oriental, ha sido definida también como Altiplano septentrional y representa una extensión

al Sur de la provincia de los Estados Unidos de América. Las estadísticas sobre incendios forestales revelan una gran incidencia de incendios forestales en esta provincia orográfica, con incendios ocurriendo muy a menudo en zonas inaccesibles.

Geológicamente la Sierra Madre Occidental está formada por una extensa meseta volcánica afectada por grabens y fallas normales. El borde oriental de la Sierra varía gradualmente hacia las provincias de las Cuencas de Sierra de Chihuahua y el borde occidental constituye una terminación abrupta con fallas normales de grandes desplazamientos y zonas de profundas barrancas.

En cuanto a los aspectos geológicos se distingue el complejo volcánico inferior de la Sierra Madre Occidental que posee una forma dominante de derrames y unidades piroclásticas de composición andesítica, pero también cuenta con intercalación de ignimbritas silíceas. Las secuencias que las constituyen son rocas enajenantes de las principales mineralizaciones de esta región de México. El complejo volcánico superior constituye la cubierta ignimbrítica continua más extensa de la Tierra, y se observa en un área alargada de Orientación noroeste-sureste con 250 km de ancho y más de 1200 km de largo.

1.3.4 La sierra Madre Oriental se compone de un sistema montañoso que ocupa una extensión considerable del territorio mexicano, desde la frontera septentrional, en el estado de Nuevo León, hasta el Sistema Neovolcánico Transmexicano. Su orientación predominante es al Noroeste y tiene unas ramificaciones al oeste, a partir de la ciudad de Monterrey hasta la de Torreón. Los rasgos más notables del relieve de esta provincia, están las formas cársticas en mesas, dispuestas en las estructuras de Sur a Norte, Numerosos poljes y cientos de dolinas existen en su superficie y asociadas cavernas de desarrollo vertical, controladas por fracturas regionales. En la vertiente oriental es una zona de altiplanicie y transicional semidesértico. Contiguas a las montañas marginales, hay numerosas acumulaciones volcánicas y algunas intrusiones que ocupan pequeñas superficies.

Aunque estadísticamente la incidencia de incendios forestales es menor que en la Sierra Madre Occidental, en periodos largos de sequía pueden incrementarse notablemente.

Los flancos exteriores de la de Sierra Madre Oriental se inclinan hacia el Golfo de México y los de la Sierra Madre Occidental, hacia el Océano Pacífico y el Golfo de California. La Altiplanicie está inclinada de sur a norte; su borde sur está formado por una enorme aglomeración de aparatos volcánicos que se extiende de este a oeste, a la que se da el nombre de Eje Volcánico. Es en esta serie de montañas se encuentran las cimas más elevadas de la República.

Desde un punto de vista geológico se puede decir brevemente que la Sierra Madre Oriental y las zonas adyacentes están constituidas principalmente por rocas sedimentarias mesozoicas que se depositaron y evolucionaron sobre un basamento paleozoico y precámbrico. La Sierra constituye una faja montañosa orogénica. Rumbo a la Mesa del Centro los valles son más amplios, las Sierras anticlinales menos estrechas y hacia el occidente son cubiertos paulatinamente por las rocas volcánicas de la Sierra Madre Occidental. El sector Sur de la Sierra Madre Oriental y parte de la llanura Costera del Golfo Sur está compuesta por gruesa secuencia de rocas sedimentarias mesozoicas que descansan sobre un basamento metamórfico que aflora principalmente en el flanco occidental de las misma Sierra. Este basamento metamórfico está constituido por exquisitos, gneises y filitas, derivados principalmente de rocas sedimentarias atribuidas al Paleozoico y Precámbrico.

1.3.5 La planicie del Noreste de México, conocida como Grandes Llanuras y Planicies de América del Norte, consiste en una cobertura de plataformas de rocas sedimentarias. El relieve es una superficie nivelada y escalonada en la que se alternan elevaciones pequeñas con planicies aluviales y de pie de monte, inclinadas en general, hacia el Sudeste. Las alturas de las planicies varían de los 1000 m.s.n.m en la base de las montañas de la Sierra Madre oriental, a los 200

m.s.n.m. hacia el margen del Río Bravo. Los incendios forestales, de pastizales principalmente, ocurren con frecuencia en estas planicies.

1.3.6 Norte de México

Los estados de Chihuahua, Coahuila y Nuevo León se encuentran ubicados en gran medida en el denominado desierto Chihuahuense con vegetación de pastizal, matorral y arbustos predominantemente. El Estado de Chihuahua en su parte oriental se caracteriza por la presencia de montañas plegadas y formadas por secuencias marinas mesozoicas. Estas montañas constituyen prominencias topográficas que se encuentran separadas por grandes llanuras que surgieron al rellenarse fosas tectónicas con sedimentos continentales y algunos derrames lávicos, lo cual dio origen a las cuencas endorreicas locales de los llamados bolsones. Por otro lado Coahuila y Nuevo León se caracterizan por la presencia predominante de rocas sedimentarias mesozoicas plegadas, que descansan sobre un basamento paleozoico y precámbrico. El rasgo fisiográfico más significativo lo constituye la flexión que sufre la Sierra Madre Oriental a la altura de Monterrey a partir de la cual adquiere una orientación más general. El relieve disminuye gradualmente al oriente hasta constituirse en la Llanura Costera del Golfo.

1.3.7 La Mesa Central se trata de una extensa altiplanicie rodeada por sistemas montañosos y que son una extensión de la Sierra Madre Occidental. El relieve consiste en una superficie inclinada de Sur a Norte, descendiendo de los 2,000m a los 1,200 m. Sobre esta se asientan montañas aisladas y conjuntos de rocas sedimentarias. Los márgenes del altiplano son afectados por la erosión remontante de las cabeceras de los ríos de la Sierra madre Occidental y por las afluencias del Lerma y el Moctezuma. En el Sur, la Mesa Central limita con el Sistema Neovolcánico Transmexicano y se extiende al norte. Al oriente se levanta el principal conjunto montañoso. Esta región de México se ve afectada fuertemente por la presencia antropogénica en la generación de incendios.

En cuanto a la geología, en la región central de México quedan comprendidas las provincias fisiográficas del Eje Neo volcánico, parte de la Sierra Madre del sur y la porción del norte de la Llanura Costera del Golfo del Sur.

El eje Neovolcanico-Transmexicano constituye una franja volcánica del cenozoico superior que cruza transversalmente la República Mexicana a la altura del paralelo veinte. Está formado por una gran variedad de rocas volcánicas que fueron emitidas a través de un importante número de aparatos volcánicos, algunos de cuales constituyen una gran altura del país. Los principales aparatos volcánicos que se localizan en estas provincias son estratovolcanes de dimensiones muy variables, como el Pico de Orizaba, el Popocatépetl, el Iztaccíhuatl, el Nevado de Toluca y el Nevado de Colima. Todos ellos fueron edificados por emisiones alternantes de productos piroclásticos y derrames lávicos. Existen además aparatos de tipos de conos cineríticos que son generalmente pequeños, tales como el Paracutín y los aparatos dominicos riolíticos que se encuentran ubicados al suroeste de Guadalajara.

En la Plataforma de Morelos-Guerrero se desarrollaron importantes depósitos marinos mesozoicos y se localizan en mayor parte en el estado de Morelos. Las unidades sedimentarias marinas de esta región se encuentran cubiertas directamente por depósitos continentales cenozoicos y rocas volcánicas del Eje Neovolcánico y remanentes de vulcanismo riolítico oligocénico. Mientras que la región metamórfica de Acatlán abarca la parte alta de la cuenca de Balsas drenada por los ríos Mixteco y Acateco y se caracteriza por extensos afloramientos de rocas metamórficas de diferentes tipos que conforman un complejo cuya edad corresponde al Paleozoico inferior.

1.3.8 Planicie costera del golfo de México esta planicie es muy variada por su morfología y los procesos actuales. Corresponde a una gran cuenca marginal al erógeno de la Sierra Madre Oriental, con espesores de rocas sedimentarias terciarias, con extensión e inclinación suave hacia el interior del golfo de México.

Se encuentra interrumpida por un conjunto montañosos. Esta región al contar con una gran cantidad de ingenios azucareros con la práctica de quema de caña de azúcar durante la zafra, contribuye con un número importante de puntos de calor o incendios a las estadísticas.

1.3.9 Sierra Madre del Sur es un sistema montañoso marginal al Pacífico, desde la Bahía de Banderas, Jalisco, hasta el Istmo de Tehuantepec, con una longitud aproximada de 1100 km, constituido por estructuras diversas respecto a su edad y origen. La Sierra Madre del Sur es un sistema de bloques montañosos, diversos en su composición y edad. El relieve está condicionado por diversos factores: la tectónica, la litología, la estructura geológica y las condiciones climáticas. Los incendios forestales que ocurren en esta zona están conectados en gran medida con prácticas de quema de biomasa con fines agrícolas.

La Sierra Madre del Sur desde Colima hasta Oaxaca, y las zonas contiguas del noroccidente de Guerrero, Michoacán y estado de México, constituyen una región con alta complejidad estructural que presenta varios dominios tectónicos yuxtapuestos. En esta región predominan afloramientos característicos geológicos de la región Noroeste de México (Tijuana, La Paz, Norte Guadalajara y Suroeste de Chihuahua) cientos volcánicos-sedimentarios del Jurásico y Cretácico, parcialmente metamorfoseado, que se encuentran cubiertos por rocas volcánicas y sedimentarias continentales del cenozoico. En Oaxaca y zonas adyacentes predominan afloramientos mesozoicos se encuentran litados por varios afloramientos metamórficos. Al noroeste se localizan las rocas metamórficas de Acatlán del paleozoico inferior que son el resultado de depósitos marinos de eugeosinclinal.

1.3.10 La Depresión de Balsas es considerada como una provincia fisiográfica parte integrante de la Sierra Madre del sur. Por sus dimensiones y relieves se considera una provincia. Tiene una orientación dominante de occidente a oriente,

con alturas mínimas de 400 m.s.n.m., delimitada en el Sur por laderas del Sierra Madre del Sur y en el norte por las del Sistema Neo volcánico Transmexicano.

1.3.11 Chiapas en Chiapas se reconocen las siguientes estructuras: **La Sierra del Soconusco, la Depresión de Chiapas y la Sierra del Norte de Chiapas.** La Sierra del Soconusco, con altitud media de 2200-2800 metros, se extiende paralelamente a la costa, está constituida por roca graníticas paleozoicas, en su relieve presenta laderas de pendiente fuerte y escarpadas, amplias superficies niveladas a manera de mesetas. De especial importancia es la Depresión de Chiapas con dimensiones de 230 por 35 km y una profundidad del orden de 2000 metros, consiste en rocas sedimentarias cretácicas y terciarias. Paralela a esta Depresión de Chiapas hasta el río Usumacinta, se extiende una serie de cadenas plegadas de rocas cretácicas y terciarias en una zona de 150 km de chura; hacia el norte, se extiende en contacto con la planicie costera. Es importante mencionar que en la región de Chiapas es práctica común llevara a cabo incendios con fines agrícolas.

En la región de Chiapas y Tabasco afloran una amplia secuencia del Mesozoico y Cenozoico constituida por rocas sedimentarias marinas que se encuentran plegadas y falladas. Esta secuencia descansa sobre un basamento cristalino del precámbrico y Paleozoico que aflora al suroeste de la misma región. Estas formas un complejo batolítico y metamórfico que constituye el núcleo de la Sierra del Soconusco. En la parte central del Chiapas descansa una secuencia sedimentaria marina del Jurásico Superior que está formada por calizas de facies someras con algunas intercalaciones de sedimentos continentales

1.3.12 La Depresión de Chiapas es una estructura de plataforma, que consiste en un conjunto de rocas sedimentarias de espesores de 2500 a 3500 metros las cuales descansan sobre un basamento paleozoico. Limita con las montañas de Chiapas y se extiende al Golfo de México con una amplia plataforma continental. La plataforma de Yucatán es una estructura geológica y geomorfológica más joven

en el territorio Mexicano. La morfología de Yucatán consiste en tres unidades principales: a) planicie costera, una franja estrecha de depósitos marinos recientes y un litoral de acumulaciones; b) la planicie interior de plataforma, en estructura escalonada y 3) la porción, meridional predominantemente de lomeríos de 200- 400 m.s.n.m. La característica principal del relieve de la península es el desarrollo cárstico, con cientos de dolinas, generalmente con un largo interior, conocidos como cenotes. Por su vegetación y la cultura de provocar incendios para fines agrícolas, la planicie de la península de Yucatán se distingue, de acuerdo a las estadísticas sobre incendios forestales, como la región de México con un problema ambiental serio.

1.4 Climas de México

En México el clima está determinado por varios factores, entre los que se encuentran la altitud sobre el nivel del mar, la latitud geográfica, las diversas condiciones atmosféricas y la distribución existente de tierra y agua. Estos factores favorecen que en el país exista una gran diversidad de climas. Generalizando, el clima de México puede clasificarse, de acuerdo a la temperatura que más predomina, en cálido y templado; y de acuerdo con la humedad existente en el medio, en: húmedo, subhúmedo y muy seco (**Figura 1.3**). El clima seco se encuentra en la mayor parte del centro y norte del país, región que comprende el 28.3% del territorio nacional; se caracteriza por una intensa circulación de vientos, con escasa nubosidad y precipitaciones en el rango de 300 a 600 mm anuales. Las temperaturas promedio varían de 22° a 26° C en algunas regiones, y en otras de 18° a 22° C. El clima seco registra temperaturas en promedio de 18° a 22° C, con casos extremos de más de 26°C; presentando precipitaciones anuales de 100 a 300 mm en promedio, se encuentra en el 20.8% del país.

El clima cálido, se subdivide en cálido húmedo y cálido subhúmedo. El primero de ellos ocupa el 4.7% del territorio nacional y se caracteriza por tener una temperatura media anual entre 22° y 26°C y precipitaciones de 2,000 a 4,000 mm anuales. El clima cálido subhúmedo se encuentra en el 23% del país; en él se

registran precipitaciones entre 1,000 y 2,000 mm anuales y temperaturas que oscilan de 22° y 26°, con regiones en donde superan los 26°C.

El clima templado se divide en húmedo y subhúmedo; en el primero de ellos se registran temperaturas entre 18° y 22°C y precipitaciones en promedio de 2,000 a 4,000 mm anuales; comprende el 2.7% del territorio nacional. Respecto al clima templado subhúmedo, se encuentra en el 20.5% del país, observa en su mayoría temperaturas entre 10° y 18° C y de 18° a 22°C. Sin embargo, en algunas regiones puede disminuir a menos de 10°C; registra precipitaciones de 600 a 1,000 mm en promedio durante el año (CONAGUA, 2014).

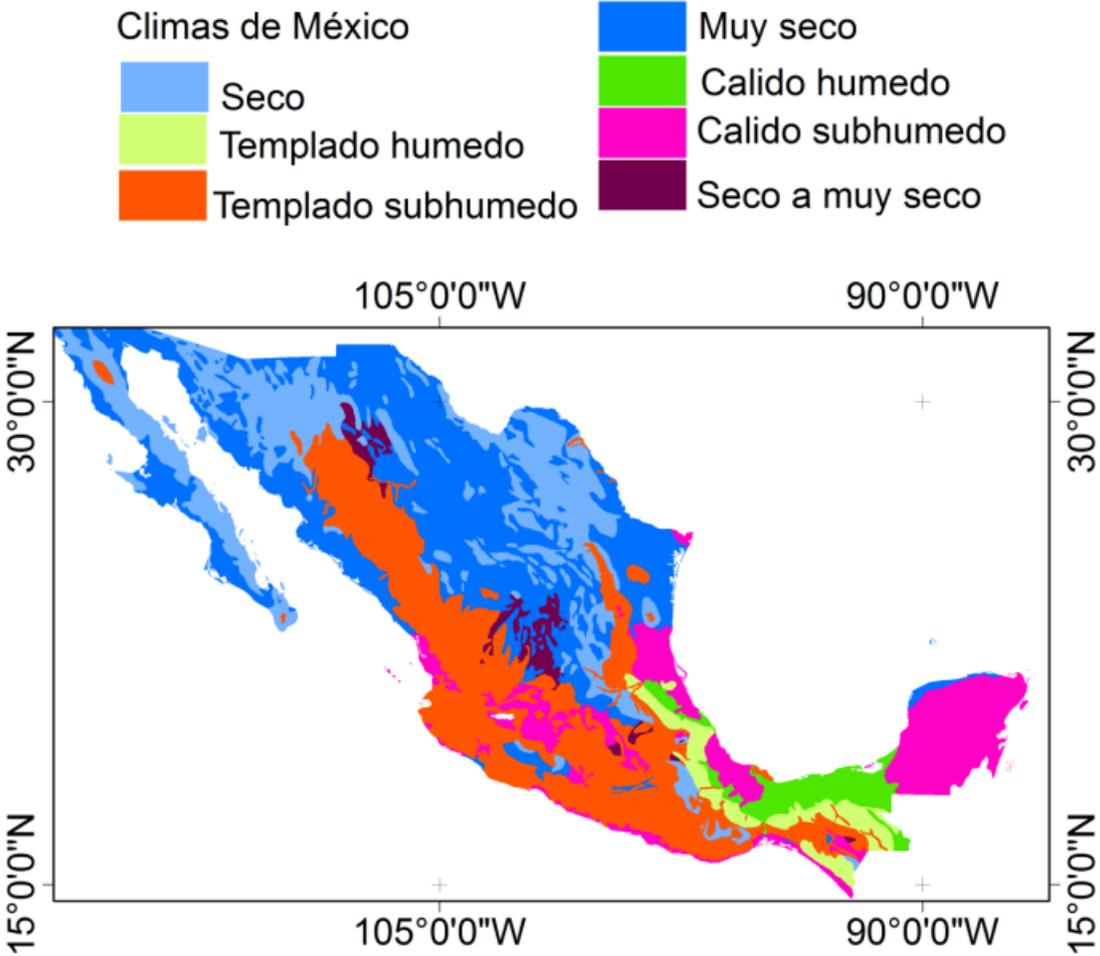


Figura 1. 3. Climas de México. Datos por CONABIO.

1.5 Tipos de Vegetación

La principal razón de la riqueza florística de México reside en su amplia variedad de condiciones fisiográficas, climáticas y su distribución geográfica. La situación de México sobre el puente continental ha demostrado que el territorio de la República ha sido escenario, en el pasado geológico, de intensas migraciones de plantas de procedencia diversa y hoy constituye una zona de influencia mixta de los elementos florísticos neotropical y holártico. Por esta razón México es considerado como centro importante de evolución de floras (Rzedowski, 2006).

Las primeras clasificaciones que el hombre concibió para las plantas estaban basadas en la distinción de biotipos fundamentales, tales como árboles, arbustos, trepadoras, etc. No obstante los modernos sistemas filogenéticos casi no consideran este criterio. Actualmente las clasificaciones y caracterizaciones de las plantas se toman en base a la morfología de la planta y el medio que ocupa (Rzedowski, 2006).

Las agrupaciones que se presentan en esta parte corresponden a los diferentes tipos de ecosistemas vegetales. Su agrupación se basa en el Sistema de Clasificación que ha desarrollado el INEGI para su utilización en la Información de Uso del Suelo y Vegetación (**ver Figura 1.4**). Su agrupación se basa en afinidades ecológicas, florísticas y fisonómicas, considerando que éstas se agrupan en primera instancia por cuestiones climática, aunque en ocasiones los aspectos geológicos y topográficos toman una especial relevancia (INEGI, 2009).

1.5.1 Bosques

Vegetación arbórea de origen septentrional (holártico), principalmente de regiones de climas templado y semifrío, con diferentes grados de humedad, propias de las regiones montañosas. Este término incluye los bosques utilizados con fines de producción, protección, conservación o usos múltiples. Se considera que un bosque es natural cuando depende del clima, del suelo de una región sin haber influido sensiblemente otros factores para su establecimiento.

En nuestro país los bosques se localizan principalmente a lo largo de la Sierra Madre Occidental, Oriental y Eje Neo-volcánico.

1.5.2 Matorrales

Los matorrales abarcan las regiones de clima árido y semiárido de México. Su distribución y fisonomía son muy variadas. Los matorrales están constituidos por vegetación arbustiva que generalmente presenta ramificaciones desde la base del tallo, cerca de la superficie del suelo y con altura variable, casi siempre inferior a cuatro metros. Los matorrales cubren la mayor parte del territorio de la Península de Baja California, así como grandes extensiones de la Planicie Costera y de montañas bajas de Sonora. Es característico de muy amplias áreas de la Altiplanicie, desde Chihuahua y Coahuila hasta Jalisco, Guanajuato, Hidalgo y el Estado de México, prolongándose aún más al sur en forma de faja estrecha a través de Puebla hasta Oaxaca. Además, constituye la vegetación de una parte de la Planicie Costera Nororiental, desde el este de Coahuila hasta el centro de Tamaulipas, penetrando hacia muchos parajes de la Sierra Madre Oriental.

En las comunidades con abundancia de elementos arbóreos la explotación forestal consiste en usar los troncos y raíces para la producción de carbón vegetal, en menor medida para postes, y en ciertas localidades para la producción de artesanías. La densidad de los matorrales es muy variable, dentro de la misma comunidad en diferentes épocas del año. La naturaleza abierta de estas comunidades implica que es difícil hablar de estratos de vegetación como tal, aunque comúnmente existen pastos y hierbas, arbustos y plantas suculentas o semisuculentas que crecen a distintas alturas dentro de la comunidad.

1.5.3 Pastizales

Este tipo de vegetación se caracteriza por la dominancia de gramíneas (pastos o zacates) o graminoides, y que en condiciones naturales se desarrolla bajo la interacción del clima, suelo y biota. El conjunto, de esta manera delimitado, incluye biocenosis diversas, por su composición florística, sus condiciones ecológicas, su papel en la sucesión, su dependencia de las actividades humanas e incluso su

fisionomía. Mientras la presencia de algunas especies está determinada por el clima, muchas otras son favorecidas, al menos en parte, por las condiciones del suelo o bien por el disturbio ocasionado por el hombre y sus animales domésticos en las regiones semiáridas y de clima más bien fresco. También, son comunes en zonas planas o de topografía ligeramente ondulada y con menor frecuencia se presentan sobre declives pronunciados.

1.5.4 Selva

En México este ecosistema vegetal abarca las selvas altas que se localizan en las zonas de clima cálido húmedo, hasta las selvas espinosas que se localizan en las zonas de clima seco, compartiendo hábitat con la vegetación de zonas áridas. Las selvas se clasifican de acuerdo a su altura y a la persistencia o caducidad de la hoja durante la época más seca del año.

Clasificación de las selvas según su altura: Selva baja: 4 a 15 m, selva mediana: 15 a 30 m y selva alta: mayor de 30 m.

Clasificación de las selvas según la caducidad de sus hojas: Caducifolia: más del 75 % de las especies tiran las hojas en la época seca del año. Subcaducifolia: entre el 50 y el 75 % de las especies tiran la hoja en la época crítica. Subperennifolia: entre el 25 y el 50 % de las especies lo hacen. Perennifolia: más del 75 % de las especies conservan la hoja todo el año.

1.5.5 Zonas Agrícolas

Aquí se incluyen los diferentes sistemas manejados por el hombre y que constituyen una cubierta de vegetación. En este gran grupo se incluyen los siguientes: agrícolas, pecuarios y forestales. Las zonas agrícolas representan el tipo de vegetación más creciente debido a las necesidades de abastecimiento de la población.

1.5.6 Otros tipos de Vegetación-Pastizal

Este tipo de vegetación se caracteriza por la dominancia de gramíneas (pastos o zacates) o graminoides, y que en condiciones naturales se desarrolla bajo la interacción del clima, suelo y biota. La presencia de esta vegetación en algunas regiones está determinada por el clima, muchas otras son favorecidas por las condiciones del suelo o bien por el disturbio ocasionado por el hombre y sus animales domésticos. En este tipo de vegetación predomina la vegetación de sabana, pastizal inducido y pastizal cultivado.

Los pastizales inducidos, son los que se observan en medio de la Selva Baja Caducifolia, sobre todo en la vertiente pacífica, donde aparentemente prosperan como consecuencia de un disturbio muy acentuado. Casi siempre se ven en las cercanías de los poblados y se encuentran tan intensamente pastoreados que durante la mayor parte del año la cubierta vegetal herbácea no pasa de una altura media de 5 cm. Son sometidos a fuegos frecuentes y la acción del pisoteo parece ser uno de los principales factores de su existencia. El largo periodo de sequía hace que tengan un color amarillo pajizo durante más de 6 meses.

El pastizal cultivado es el que se ha introducido intencionalmente en una región y para su establecimiento y conservación se realizan algunas labores de cultivo y manejo. Son pastos nativos de diferentes partes del mundo: Estos pastizales son los que generalmente forman los llamados potreros en zonas tropicales, por lo general con buenos coeficientes de agostadero.

1.5.7 Otros tipos de vegetación

En este tipo de vegetación se encuentran agrupados los siguientes tipos de vegetación:

a) Manglar

Es una comunidad densa, dominada principalmente por un grupo de especies arbóreas, ocasionalmente arbustiva, cuya altura es de 3 a 5 m, pudiendo alcanzar

hasta los 30 m. Se desarrolla en zonas de lagunas costeras y desembocaduras de ríos, así como en las partes bajas y fangosas de las costas.

b) Popal

Comunidad vegetal propia de lugares pantanosos o de agua dulce estancada, de clima cálido y húmedo, principalmente plantas herbáceas de 1 a 2 m de alto.

c) Tular

Es una comunidad de plantas acuáticas, arraigadas en el fondo, constituida por monocotiledóneas de 80 cm hasta 2.5 m de alto, de hojas largas y angostas o bien carente de ellas. Su distribución es cosmopolita, se desarrollan en lagunas y lagos de agua dulce o salada y de escasa profundidad, principalmente en la zona del altiplano.

d) Chaparral

Este tipo de vegetación está constituido por una asociación generalmente densa, de arbustos resistentes al fuego, que se desarrolla sobre todo en laderas de cerros por arriba del nivel de los matorrales de zonas áridas y semiáridas de pastizales naturales y en ocasiones mezclada con los bosques de pino y encino. El segundo tipo de matorral propio de la misma región prospera por lo general en altitudes más elevadas de las sierras de Juárez y San Pedro Mártir y en las montañas de la Isla Cedros, ocupando muchas áreas de suelos someros que no tienen humedad suficiente para la existencia de vegetación boscosa, o bien desarrollándose como comunidad secundaria en sitios donde tal vegetación ha sido destruida. Es un matorral perennifolio, por lo común de 1 a 2 m de alto, muy denso y difícilmente penetrable, cuya existencia frecuentemente resulta también favorecida por incendios, ya que muchos de los arbustos tienen la capacidad de regenerar a partir de sus sistemas radicales.

e) Palmar

Es una asociación de plantas monopódicas que pueden formar bosques aislados cuyas alturas varían desde 5 metros hasta 30 metros o menos. Se desarrollan en climas cálidos húmedos y sub-húmedos, generalmente sobre suelos profundos y

con frecuencia anegados, con características de sabana. Se le puede encontrar formando parte de las selvas o como resultado de la perturbación por la actividad humana.

f) Sabanas

El origen de las sabanas, se debe a la intervención del hombre que ha talado, quemado y sobrepastoreado el bosque, al grado de volverse tolerante al fuego. La sabana está dominada principalmente por gramíneas, pero es común encontrar un estrato arbóreo bajo de 3 a 6 metros de alto. Se desarrolla sobre terrenos planos o poco inclinados, en suelos profundos y arcillosos que se seca se endurecen al perder el agua. La vegetación de esta comunidad se caracteriza por la dominancia de pastizales.

El uso principal de las sabanas es la ganadería, por la gran cantidad de gramíneas que en ella se encuentran. La recolección de frutos de nance y jícaro son importantes por su valor comestible, medicinal y artesanal.

g) Vegetación de dunas costeras

Esta comunidad se establece a lo largo de las costas, se caracteriza por la presencia de plantas pequeñas y suculentas. Las especies que la forman juegan un papel importante como pioneras y fijadoras de arena, evitando con ello que sean arrastradas por el viento y el oleaje.

1.5.8 Agrícola-Selva

Esta tipo de vegetación se compone de agricultura de temporal y vegetación secundaria de selva. La agricultura de temporal es cuando el agua necesaria para su desarrollo vegetativo es suministrada por la lluvia. La vegetación secundaria de selva es la comunidad de vegetales que resulta de la vegetación primaria y que puede estar en estado de recuperación tendiendo al estado original, en otros casos presenta un aspecto y composición florística diferente a las plantas que la rodean. Se desarrollan en zonas desmontadas para diferentes usos y en áreas agrícolas abandonadas, se desarrollan después de transcurridos varios años del desmonte original y después de la etapa de plantas herbáceas y arbustivas.

1.5.9 Selva Agrícola

Estas comunidades de vegetación se componen de una mezcla de vegetación de selvas baja, mediana y alta y de vegetación secundarias de selvas así como de áreas agrícolas de temporal. Son regiones que han sido alteradas por las actividades humanas.

1.5.10 Pastizal Agrícola

Son regiones cubiertas de pastizal cultivado y pastizal inducido y de agricultura de temporal.

1.5.11 Agrícola Pastizal

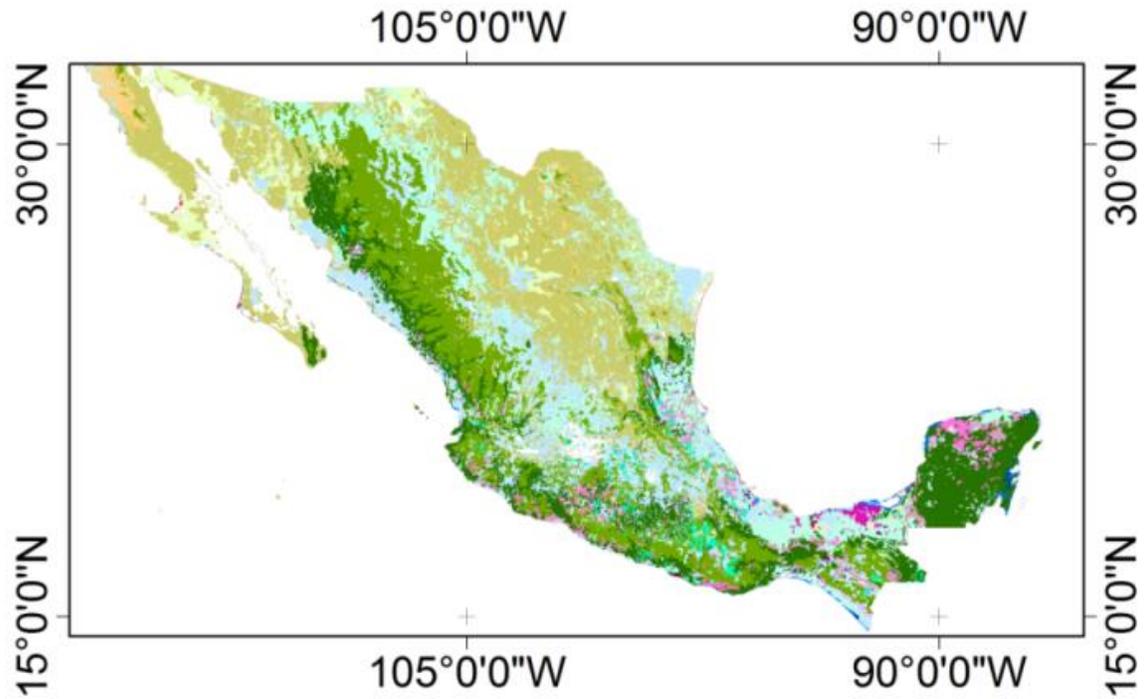
Son comunidades de vegetación en la que se tiene agricultura de temporal y pastizal cultivado; agricultura de temporal y pastizal inducido. Predominando más este último.

1.5.12 Selva Pastizal

Comunidades de vegetación compuesta de selva mediana y vegetación secundaria de selva y pastizal cultivado e inducido.

1.5.13 Pastizal Selva

En este tipo de vegetación se agrupan; el pastizal cultivado y la vegetación secundaria de selva.



Tipos de vegetación

- | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Pastizal agrícola |  Tular |
|  Selva agrícola |  Chaparral |
|  Agrícola selva |  Sabanas |
|  Otras vegetaciones |  Popal |
|  Otros pastizales |  Palmar |
|  Área agrícola |  Manglar |
|  Pastizales |  Vegetación de dunas costera |
|  Matorral |  Pastizal selva |
|  Selva |  Selva pastizal |
|  Bosque |  Agrícola pastizal |

Figura 1. 4. Tipos de Vegetación de México. Datos por CONABIO.

Capítulo 2

2.1 Incendios Forestales

México por su situación geográfica, la gran diversidad de vegetación y los diferentes sistemas climáticos favorecen que sea una de las regiones más afectadas por incendios forestales cada año (Wong *et al*, 2007). Estos incendios afectan en diferente magnitud los diferentes componentes del medio ambiente, uno de ellos es la calidad del aire debido a las emisiones de contaminantes que se producen durante la quema de la biomasa. Por la importancia que tiene los incendios forestales en México, este capítulo se dedica exclusivamente a los incendios forestales.

Diariamente se queman miles de hectáreas de bosques, sabanas, pastizales, matorrales, desiertos, humedales y campos agrícolas en alguna parte del globo. El fuego desempeña un rol importante dentro del ciclo vital de los ecosistemas forestales adaptados al fuego, pero se convierte en problema a partir de la intervención humana (CONAFOR, 2013). El impacto ecológico de los incendios en los ecosistemas forestales tiene muchas repercusiones sobre la diversidad biológica.

Uno de los efectos ecológicos más importantes de los incendios es la mayor probabilidad de que se produzcan nuevos episodios de incendios del mismo tipo en los años subsiguientes, por la disposición de los combustibles forestales que se producen. Al caer los árboles, permite que la luz del sol reseque el bosque y produzca una acumulación de combustible con un aumento de especies susceptibles a los incendios. Por lo que, los incendios frecuentes en una cobertura vegetal se convierte en uno de los factores principales del empobrecimiento de la biodiversidad en los ecosistemas (FAO, 2006).

2.1.1 Los combustibles forestales

Los combustibles forestales es toda biomasa susceptible de arder y mantener un proceso de combustión. Los combustibles forestales están integrados de materia orgánica incluyendo la biomasa de plantas vivas y muertas; su follaje, tallos y ramas, raíces, frutos así como troncos de árboles en pie o caídos, tocones, residuos leñosos, hojas que se encuentran en el mantillo y la materia orgánica del suelo (Morfín-Ríos *et al.*, 2012).

El mantillo contribuye poco con la biomasa total del combustible y puede consumirse rápidamente por el fuego en períodos secos. Lo mismo sucede con la hojarasca que generalmente es muy inflamable en períodos secos. Otros componentes del suelo son los diferentes tipos de leños, típicos combustibles lentos, que se clasifican por su grosor; la inflamabilidad de los frutos, conos o bellotas y de las semillas que depende de sus contenidos de resinas. Cuanto mayor sea la acumulación de combustible en una zona, mayor cantidad de calor podrá desprenderse y el incendio podrá ser más intenso. El peso total de combustible es el peso de biomasa por unidad de superficie del terreno (Villers-Ruiz, 2006). La acumulación de combustibles forestales y la compactación de éste sobre el terreno, así como el grado de humedad de cada tipo de combustible da lugar a un determinado tipo de incendio forestal.

2.1 2 Tipos de incendios forestales

a) Incendios Superficiales: Se producen cuando el fuego se propaga en forma horizontal sobre la superficie del terreno y alcanza hasta metro y medio de altura. Éstos afectan combustibles vivos y muertos como pastizales, hojas, ramas, ramillas, arbustos o pequeños árboles de regeneración natural o plantación, troncos y humus.

b) Incendio Subterráneo: Se propaga bajo el suelo en este caso llega a quemarse la materia orgánica acumulada y las raíces. Habitualmente éstos no producen llamas y emiten poco humo.

c) Incendios de Copa o Aéreos: El fuego consume toda la vegetación. También comienzan en forma superficial y las llamas avanzan primero sobre el nivel del suelo y se propagan por continuidad vertical, es decir, escalan vegetación dispuesta hacia arriba que sirve de combustible en escalera hacia las copas de los árboles.

El tipo de incendios que ocurre en un determinado ecosistema depende de tres factores principales: a) Condiciones permanentes en cuanto a la composición de los combustibles que es el elemento principal que determina las características del incendio y las especies vegetales. b) la topografía y c) las condiciones transitorias del tiempo meteorológico (temperatura humedad relativa velocidad y dirección del viento; y precipitación pluvial (CONAFOR-GPPC, 2010).

2.1.3 Topografía

La topografía impacta la distribución de los combustibles forestales e influye en la susceptibilidad para encenderse. Las variaciones en la pendiente de laderas y su altura producen cambios caóticos en la conducta del fuego y en su progreso sobre el terreno.

El grado de inclinación de una zona geográfica puede afectar a la cantidad de combustible que está disponible y aumentar la velocidad de propagación del fuego. Cuanto más pronunciada sea la pendiente, tanto mayor será el grado de precalentamiento al que pueden estar sometidos los combustibles y será más rápida la propagación del fuego. Las características topográficas alteran los procesos normales de transferencia de calor hacia la atmosfera y modifican los patrones generales del tiempo a nivel local.

El comportamiento del fuego y su propagación no dependen exclusivamente de la inclinación de la ladera, sino también de su orientación. La orientación determina la cantidad de luz solar, precipitación y viento que recibe la ladera, estos factores influyen directamente en las condiciones del combustible (COMET S-290, 2009).

2.1.4 Condiciones Meteorológicas

Para comprender el comportamiento del fuego y sus efectos en el medio ambiente es importante entender los factores meteorológicos que favorecen las igniciones y dispersan los contaminantes (Bessie and Johson, 1995).

El clima es un factor importante, que influyen en la humedad de los combustibles forestales, en la dispersión del fuego y de los contaminantes que se emiten a la atmósfera. En la época de bajas precipitaciones los combustibles forestales tienen una baja humedad y si hay presencia de vientos, estos secan los combustibles y plantas en pie haciéndolos más susceptibles para incendiarse.

Otro factor, es la temperatura, el aire caliente conduce una mayor evaporación del agua superficial y el suelo puede llegar a quedar completamente seco. Si la alta temperatura se prolonga un tiempo suficiente, la evaporación aumenta y los efectos de enfriamiento disminuyen en la superficie del suelo, la sequía aumenta y por ende la sequedad del combustible es más severa. Por lo que, la temporada seca está íntimamente relacionada con la presencia de incendios forestales.

Los efectos del clima a escala local son afectados por los procesos físicos de gran escala. Por ejemplo la energía del Sol que recibe la atmosfera de la Tierra, los océanos y la biosfera son los controladores internos de la ignición de combustibles forestales (Gail, 2007).

El comportamiento del fuego y de la dispersión de los contaminantes producidos durante la quema están directamente relacionados con los patrones de clima de la región debido a los mecanismos del fuego que dependen de las condiciones climáticas locales siendo ésta muy variable; el contenido de humedad de los combustibles, la velocidad de viento y la características de los ecosistema en cuanto a la cantidad y estructura de carga de combustibles forestales (Gail, 2007).

2.1.5 Incendios Provocados por el hombre

Esta bastante documentado que de los miles de incendios forestales que ocurren en el planeta, el 90% de ellos se debe a las actividades humanas y el resto a procesos naturales (Levine *et al.*, 1999; Lobert *et al.*, 1991). Las regiones más afectadas son los países localizados en las zonas tropicales. Los bosques tropicales están sometidos a incendios causados por los seres humanos con el fin

de talar árboles para practicar la agricultura. La deforestación es más comunes en los bosques alterados donde se queman árboles en pie, maleza e incluso quemar completamente el bosque, dejando el suelo totalmente descubierto (FAO, 2002).

El fuego en bosques no adaptados a la práctica de quema ocasiona la desaparición de prácticamente todas las plántulas, brotes, lianas, árboles jóvenes, ya que no están protegidos por una corteza gruesa. El daño causado al banco de semillas, las plántulas y los brinzales obstaculiza la recuperación de las especies originales (FAO, 2002).

En los bosques tropicales se producen incendios todos los años durante la estación seca, las especies arbóreas muestran rasgos adaptativos como una corteza gruesa, la capacidad de cerrar las cicatrices dejadas por el fuego, la capacidad de rebrotar y adaptaciones de las semillas. La importancia ecológica de estos incendios anuales sobre las formaciones forestales es notable. Los incendios promueven la aparición de especies tolerantes al fuego, que sustituyen a las especies que crecen en un entorno inalterado (FAO, 2002).

2.1.6 Efectos del fuego sobre la fauna forestal

Si un bosque no está adaptado al fuego, éste puede tener efectos devastadores sobre las especies de vertebrados e invertebrados, causando la muerte directa y provocando efectos indirectos más duraderos como estrés y desaparición de hábitats, territorios, cobijo y alimento (**Figura 2.1**). La desaparición de organismos de gran importancia para los ecosistemas forestales, tales como invertebrados, polinizadores y descomponedores, puede retardar de forma muy significativa el índice de recuperación del bosque (FAO, 2002).



Figura 2.1. Incendio forestal. NASA, 2006.

Disponible en: http://www.nasa.gov/vision/earth/environment/central_am_fires.html.

2.1.7 Desaparición de hábitats, territorios y cobijo

La destrucción de árboles huecos en pie y de árboles muertos caídos tiene efectos negativos sobre la mayor parte de las especies de mamíferos y sobre las aves que anidan en las cavidades (**Figura 2.1**). Las aves y mamíferos emigran o mueren ante la ocurrencia de un incendio, lo cual puede alterar el equilibrio local y en última instancia la pérdida de vida silvestre, dado que los ejemplares desplazados no tienen lugar al cual dirigirse (FAO, 2002).

2.1.8 Pérdida de alimentos

La pérdida de árboles frutales se traduce en una reducción del número de especies de aves y de animales que se alimentan de frutos; este efecto es particularmente acusado en los bosques tropicales. En los bosques quemados se reducen las poblaciones de mamíferos pequeños, aves y reptiles y también los carnívoros tienden a evitar las zonas quemadas. La disminución de la densidad de pequeños mamíferos como los roedores puede influir negativamente en el suministro de alimentos a los carnívoros de tamaño reducido. Los incendios también destruyen la hojarasca y las comunidades de artrópodos que la habitan, limitando aún más la disponibilidad de alimentos para las especies de omnívoros y carnívoros (FAO, 2002).

2.1.9 Pérdidas económicas

Los incendios forestales son causa de pérdidas económicas en los países que registran alto número de incendios forestales anualmente. Por ejemplo: México, reporta pérdida en el año 2003 de 337 millones de dólares en madera debido a incendios forestales (FAO, 2006). África y Brasil reportan efectos negativos en el turismo debido a los daños ocasionados por el fuego en la vegetación. Otros países como la India, Rusia, Asia, Canadá, Estados Unidos, también, reportan grandes pérdidas económicas por quema de biomasa (FAO, 2006).

2.2 Contaminación atmosférica producida por incendios forestales

La quema de biomasa ocasiona diversos daños al medio ambiente, pérdida de vegetación, especies animales, cobertura de suelo y deterioro en la calidad del aire de las regiones que son afectas con incendios frecuentes (Cochrane, 2001; Contreras-Moctezuma *et al.*, 2003).

Los contaminantes producidos en la quema de biomasa favorecen la formación de niebla tóxica y a su vez; afecta la visibilidad y salud de las personas que se exponen a estas emisiones (**Figura 2.2**).



Figura 2.2. Incendios forestal y contaminación atmosférica. Acloservivía: NASA. Earth Observatory (NASA, 2013).

Los contaminantes que más predominan durante la quema de biomasa son sustancias complejas. Existe amplia información científica en la que se reportan

que las sustancias que más predominan durante un incendio forestal es: dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), vapor de agua y pequeñas cantidades de metano (CH₄) (Lobert *et al.*, 1991; Nicholas *et al.*, 2006; Dale *et al.*, 1994; Contreras-Moctezuma *et al.*, 2003).

El humo producido durante un incendio forestal altera los ciclos geoquímicos que existen de manera natural en la atmósfera y causan mala calidad del aire (Levine, *et al.*, 1999). Las plumas de humo originado en la quema de vegetación, son dispersadas a través de la circulación atmosférica pudiendo alcanzar grandes distancias y afectar extensas regiones (**Figura 2.2**). Damoah *et al.*, (2004), muestra que, una pluma de humo proveniente de incendios forestales ocurridos en Rusia, circunnavegó desde el 10 hasta el 31 de mayo del 2003. La pluma de humo fue observada en varias regiones del Mundo (Canadá, Escandinava, Noreste-Atlántico, Alemania, Europa y Groenlandia).

La cantidad de contaminante emitido a la atmósfera por incendios forestales es compleja de cuantificar debido a los diversos factores que intervienen en la ignición (Levine *et al.*, 1999; Lazaridis *et al.*, 2008). Considerando los siguientes parámetros: Carga de combustible forestal, tipo de vegetación quemada, eficiencia de quema y área quemada. Es posible estimar la cantidad de contaminantes de CO₂, CH₄ y CO producido por la quema de biomasa. Los parámetros para estimación no siempre se consiguen con facilidad y pueden provenir de datos estadísticos, imágenes de satélite, estudios en laboratorio o mediciones en campo (Levine, 2000).

Se tiene información de valores y rangos de emisión de CO₂ por quema de biomasa en diferentes partes del planeta como resultado de la aplicación de diferentes metodologías utilizadas por los expertos.

Por ejemplo, Kasischke *et al.*, (2003) estimó un rango de emisión de 828-1103 Tg de CO₂ emitido por quema de biomasa en Rusia y Norte América en 1998. Hoelzemann *et al.*, (2004) estimó 5716 Tg de CO₂ producidos por quema de

biomasa en diferentes regiones del planeta. Wiedinmyer and Jason, (2007) calcularon 80-213 Tg de CO₂ para el periodo 2002-2006 por incendios forestales ocurridos en Estados Unidos, y, Nicholas *et al.*, (2006) estimó 6 Tg de CO₂ emitido por incendios forestales ocurrido en el mes de octubre al Sur de California en el 2006.

Los efectos del fuego en los ecosistemas globales son factores claves en el cambio climático debido a las grandes cantidades de contaminantes que se emiten a la atmosfera durante la quema de biomasa.

Conocer en qué orden de magnitud se emite el CO₂ producido en la quema de biomasa es importante en la química de la atmósfera y el ciclo del carbono tan esencial en la sustentabilidad de la vida en el planeta, además el CO₂ es un gas de efecto invernadero y que tiene implicaciones en el cambio climático (Raich y Schlesinger, 1992; Lazaridis *et al.*, 2008).

2.2.1 Importancia del CO₂ en la atmosfera

La mayoría de los gases que son emitidos por los incendios forestales son gases que favorecen el efecto invernadero y al cambio climático. El dióxido (CO₂) de carbono se emite espontáneamente en la naturaleza y se crea también como consecuencia de la quema de combustibles de origen fósil y biomasa, así como de cambios en el uso de suelo y procesos industriales. El CO₂ es el principal gas de efecto invernadero que afecta al balance radiactivo de la Tierra. Es el gas que se toma como marco de referencia para medir otros gases de efecto invernadero, y por lo tanto su potencial de calentamiento de la Tierra (PCT) es 1(IPCC, 2001).

En su forma natural el dióxido de carbono es esencial para la vida en la Tierra y una parte integral del ciclo del carbono que interactúa con los océanos de la Tierra, el suelo, las rocas y la biosfera. Biológicamente, las plantas y otros fotosintetizados consumen el carbono de la atmósfera y lo utilizan para la construcción de sus cuerpos a través del proceso de la fotosíntesis. El dióxido de carbono (CO₂) tiene una larga vida en la atmosfera terrestre. La cantidad de CO₂ en su forma natural es de aproximadamente 0,0397%. Aunque es una cantidad pequeña el CO₂ es necesario para mantener la temperatura superficial terrestre.

El fenómeno de calentamiento global ha sido atribuido principalmente al aumento de las concentraciones de dióxido de carbono y otros gases en la atmósfera de la Tierra (IPCC, 2009). Desde la Revolución Industrial, la concentración de dióxido de carbono se ha incrementado notablemente desde 280 ppm a 395 ppm a partir de 2013 (IPCC, 2013). En la actualidad está aumentando a un ritmo de aproximadamente 2 ppm / año. Muchas de las fuentes emisoras son de origen antropogénicos y se estima que el 30-40 % del dióxido de carbono liberado por los seres humanos a la atmósfera se disuelve en los océanos, ríos y lagos. Esto favorece la acidificación de los océanos. El nivel actual de CO₂ es la más alta de los últimos 800.000 años y probablemente la más alta de los últimos 20 millones de años (NCARG, 2010; EPA, 2015). Además de las actividades humanas que incrementan el CO₂, los incendios forestales que ocurren cada día en el planeta y que emiten altas cantidades de CO₂ a la atmósfera que favorecen incremento de este gas en las diversas escalas del Mundo.

2.2.2 El metano (CH₄)

El metano (CH₄) es un gas de efecto invernadero importante en la química de la atmósfera que se producen por fuentes naturales. Los gases de efecto invernadero impiden que el calor emitido por la Tierra se escape al espacio. El efecto invernadero natural es necesario para la vida tal como la conocemos. Desde el siglo pasado, los humanos están incrementando los niveles naturales de metano (CH₄) a través de las actividades que realizan, tales como: quema de combustibles fósiles y deforestación. El incremento de este gas en la atmósfera está incrementando la temperatura global promedio, lo que perjudica al equilibrio del sistema climático terrestre y sostenimiento de la vida en el planeta.

El metano en la actualidad es emitido por las fuentes naturales como son procesos geológicos y bacterias que producen metano en pantanos-humedales y los incendios forestales que ocurren en forma natural en ecosistemas adaptados al fuego. Las fuentes antropógenas de metano son: la quema de combustibles fósiles, la quema de residuos agrícolas y producción de rumiantes (IPCC, 2009). Otras fuentes emisoras de Metano son propiciadas por el hombre alterando las

fuentes naturales emisoras como por ejemplo los incendios inducidos en pastizales y bosques, selvas y sabanas. Estos ecosistemas están siendo alterados por el humano quien realiza la tumba y quema de la vegetación para dar un uso diferente a las tierras, esto propicia que se emitan a la atmósfera grandes cantidades de Metano.

De acuerdo a la EPA, (2010), los incendios forestales cada año emiten en un rango de 2 a 5 Tg de Metano. Este rango varía con el número de incendios forestales ocurridos en los diferentes tipos de ecosistema del Planeta. La estimación considera que del total de los incendios que ocurren 10% son de fuentes naturales y 90% son por acciones del humano. Por lo que considera que 10% de las emisiones de Metano son por fuentes naturales y 90% por acciones humanas, solo para el caso de las emisiones por incendios.

El incremento de concentración metano en la atmósfera, producen un aumento neto en la absorción de energía por la Tierra, lo que lleva al calentamiento de la de la Tierra, tal como ha sido observado en las últimas décadas.

El metano es un gas de efecto invernadero de larga vida y es químicamente estable y persisten en la atmósfera en escalas de tiempo de una década (IPCC, 2009). Por esta razón, las emisiones de metano por incendios forestal tienen una influencia a largo plazo sobre el clima. El curso de la vida química de CH_4 y de la eliminación a través de reacciones con el radical hidroxilo (OH) se estima en 9.6 años. Realmente permanece en la atmósfera durante lo que se conoce como un curso de la vida de perturbación de aproximadamente doce años antes de la extracción y la conversión final a dióxido de carbono (CO_2).

El metano como un gas de efecto invernadero es responsable del aumento del forzamiento radiactivo del sistema climático. El forzamiento radiactivo es una medida de cómo se ve influido el balance energético del sistema Tierra-Atmósfera cuando se alteran los factores que afectan el clima.

Durante un período de 100 años, cada molécula de CH₄ tiene 25 veces el potencial de calentamiento global directo de una molécula de CO₂.

Durante los últimos 650.000 años, las concentraciones atmosféricas de CH₄ han variado desde un mínimo de alrededor de 400 partes por mil millones (ppb) durante los períodos glaciales a máximos de unos 700 ppb durante los períodos interglaciares. El CH₄ atmosférico se ha incrementado en cerca de 1.000 ppb desde el comienzo de la era industrial a finales del año 1700, en representación de los cambios más rápidos de este gas durante al menos los últimos 80.000 años (Solomon *et al.*, 2007b).

2.2.3 Importancia del CO

El monóxido de carbono es un gas muy tóxico que se genera por procesos de combustión e ingresa al medio ambiente a través de distintas fuentes de emisiones. La inhalación de monóxido de carbono es dañina por su grado de toxicidad para el ser humano y animales. Además de sus efectos tóxicos, es posible que el monóxido de carbono sea también uno de los factores del cambio climático mundial debido a su rápida oxidación para formar dióxido de carbono.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda como límite una concentración de 9 ppm ó 10,000 µg/m³ en promedio de 8 horas 1 vez al año. La Norma Oficial Mexicana de CO establece como límite de protección a la salud, una concentración de 11.00 ppm o 12,595 µg/m³ promedio de 8 horas, la cual puede rebasarse 1 vez al año, como medida de protección a la salud de la población susceptible (Hosking *et al.*, 2011).

2.3 Efecto en la población humana

El humo de los incendios provoca innumerables problemas respiratorios, cardiovasculares y oculares. Además de la gran cantidad de trastornos constrictivos y obstructivos de los pulmones que se han presentado, los casos de asma, neumonía, bronquitis, laringitis aguda, bronquiectasia y conjuntivitis han aumentado de manera alarmante. El daño que causa en la salud la inhalación de

humo depende de sus componentes, de su concentración y del tiempo total de exposición (OMS, 2015). También puede matar: en 1998 murieron 70 bomberos mexicanos y en la amazonia brasileña hubo 700 muertes asociadas al humo (PENUMA, 2002).

2.4 Incendios forestales en México

En México desde hace décadas se ha venido desarrollando una estrategia general de prevención y control de incendios forestales, sistematizada a través del Programa Nacional de Protección contra Incendios Forestales, y en cuya aplicación participan instituciones de los tres órdenes de gobierno, organismos civiles y voluntarios. Desde el año 2002 la instancia responsable de la operación y coordinación general del Programa de Incendios es la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). La CONAFOR lleva el registro de números de incendios forestales y áreas afectadas para cada año.

La siguiente serie muestra el número de incendios y áreas afectadas desde 1970 hasta el año 2010 documentados por la CONAFOR (**Figura 2.3**).

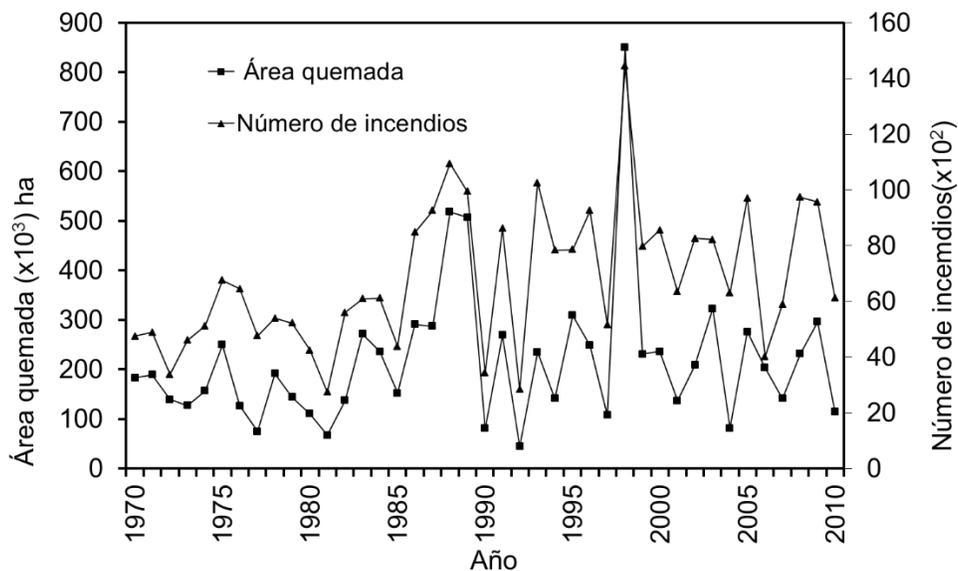


Figura 2.3. Incendios forestales y áreas afectadas en México documentados por la CONAFOR.

En el año 1998 ocurrieron cerca de 16000 incendios forestales en México (**Figura 2.3**) y los daños provocados por eventos tuvieron grandes efectos en las zonas naturales de México, en respuesta a esta problemática la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) implementó el programa denominado Programa de detección de puntos de calor mediante técnicas de percepción remota, este programa se ha llevado a cabo desde 1999 a la fecha y se mantiene actualizado diariamente.

2.4.1 Monitoreo de incendios forestales en México

Para el monitoreo de puntos de calor en México se utiliza el sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). Este sensor, a bordo de los satélites de la serie National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), tienen una resolución espacial de 1.1 kilómetro y ha permitido crear bases de datos globales con más de dos décadas de datos gracias a las adquisiciones diarias de imágenes.

A partir del año 2000 fue automatizado el proceso de obtención y manejo de la información por medio de un algoritmo para la detección de los incendios dos veces al día, bajo la supervisión y revisión manual de la calidad de los resultados por parte de un analista. El tiempo de respuesta se redujo con la adquisición de una estación receptora en la CONABIO al final del año 2000, para recibir datos de NOAA-AVHRR en forma directa (Tzitziki *et al.*, 2011).

La CONABIO, en sus instalaciones, cuenta con la antena y el equipo necesario para recibir y procesar los datos MODIS transmitidos desde los satélites Terra y Aqua. Estos satélites vuelan a una altitud de 705 km sobre la Tierra, observan con pasos diarios la superficie total de la Tierra de 1 a 2 días.

Los componentes de la estación de recepción en la CONABIO son: 1) antena de seguimiento al satélite y captura los datos que transmite; 2) una estación de trabajo, desde la cual se administran todos los recursos de la estación de

recepción y 3) un receptor y demodulador para recibir la señal de los satélites en frecuencias específicas. Los satélites Terra y Aqua transmiten datos en diferentes frecuencias en la banda X.

El área de estudio de la detección de incendios está definida por la disponibilidad de los datos que recibe la CONABIO, que depende básicamente de la localización geográfica del sistema de recepción, (ubicado en la Ciudad de México en los 19° 18' 3.6" de latitud norte y 99° 11' 9.6" de longitud oeste) y del círculo de recepción. Por lo anterior, el área de estudio se extiende desde el sur de los Estados Unidos hasta la frontera de Panamá con Colombia, cubriendo todo México y Centro América (Tzitziki *et al.*, 2011)

2.4.2 Detección de incendios

En la detección de incendios forestales utilizando imágenes de satélite, se define el concepto de punto de calor. La CONABIO considera como un punto de calor el pixel que reporta una temperatura elevada en comparación con sus vecinos y cumple con los umbrales establecidos en el algoritmo la temperatura umbral establecida es de 300 °K durante el día y 298 °K durante la noche.. Este algoritmo fue desarrollado por la Universidad de Maryland y el código fuente fue proporcionado por el Direct Readout Lab de la NASA e implementado en la estación de recepción de imágenes MODIS que forma parte del programa para la detección de puntos de calor mediante técnicas de percepción remota de CONABIO.

Este método utilizado para la detección de puntos de calor utilizado, no permite saber el número de incendios y su tamaño (debido a la resolución espacial). Por lo tanto no se tiene la certeza que cada punto de calor corresponda a un incendio o una quema agrícola, ya que el área que cubre un pixel en el sistema de alerta temprana para incendios forestales en México puede estar ocurriendo uno o más incendios que generan la suficiente temperatura para alcanzar los umbrales establecidos en el algoritmo.

El algoritmo inicia con la eliminación de los píxeles considerados como datos nulos, nubes, cuerpos de aguas, zonas urbanas y zonas sin vegetación. Se aplican diferentes técnicas con control de calidad para eliminar datos que no correspondan a un potencial de incendio. Como producto final del algoritmo se tiene una imagen raster que contiene las coordenadas de los puntos de calor (Tzitziki *et al*, 2011).

La **Figura 2.4** presenta los puntos de calor para el periodo elegido en este estudio. El mapa se realizó con datos de la CONABIO.

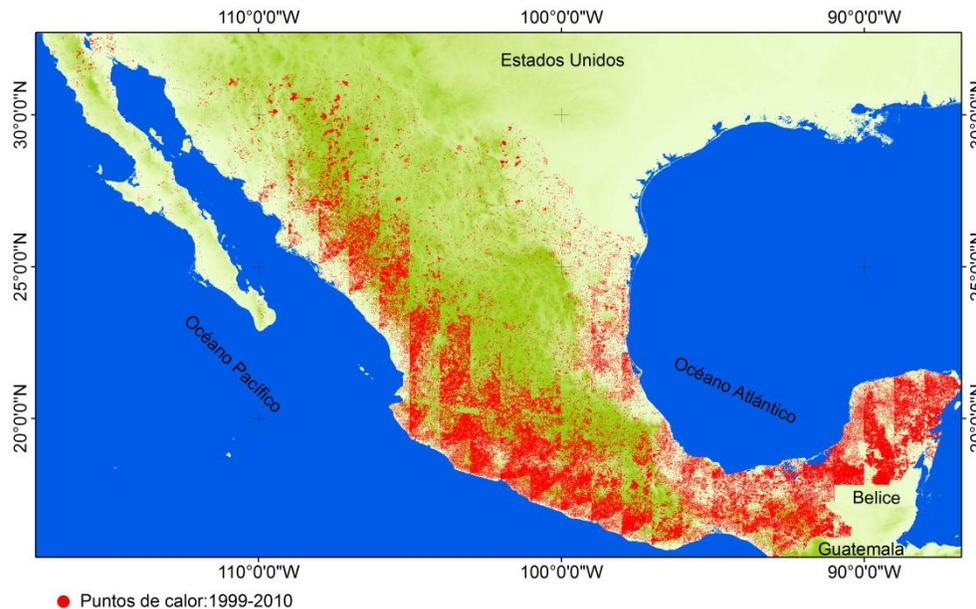


Figura 2.4. Puntos de calor de 1999 a 2010: Datos fuente: CONABIO.

2.4.3 Validación en la detección de puntos de calor

En cuanto a la validación de los datos que reporta la CONABIO acerca de los puntos de calor es difícil porque no existen suficientes datos de campo para la validación. Por lo que la validación de los datos registrados por MODIS se compara con datos de satélite de alta resolución espacial. Esta son las opciones más comunes para validación. Para validar los puntos de calor en México, la CONABIO realizó un análisis y comparación de sus datos con datos registrados por FIRMS (Fire Information for Resource Management System) de la Universidad

de Maryland. El análisis se realizó comparando los puntos detectados en cada paso del satélite, desde el año 2004 hasta el año 2007. El resultado fue un 85 % de correlación entre ambos satélites (Yosio *et al*, 2011).

La información de puntos de calor que publica la CONABIO tiene algunas ventajas y desventajas. La desventaja es que siempre se tiene la incertidumbre de que un punto de calor corresponda efectivamente a un incendio forestal, algunos incendios forestales no son detectados por el satélite debido al diseño del algoritmo implementado en el sensor del satélite, el incendio puede ocurrir antes o después del paso del satélite, algunos incendios pueden generar bajas temperaturas que no son registradas por el sensor (Yosio *et al*, 2011). La principal ventaja de los datos se debe a que reporta la localización de muchos incendios forestales que ocurren en regiones montañosas en las que no es fácil el accesos para su mitigación, se tiene información útil y oportuna para prevención y combate de incendios en las zonas de fácil acceso (Yosio *et al*, 2011) .

La información que publica la COANBIO ha servido de base en este estudio para realizar estimaciones de algunos contaminantes emitidos a la atmosfera debido a los incendios forestales que ocurren en México y que a la fecha no se tiene información cuantitativa de las toneladas liberadas a la atmosfera de gases y partículas por la quema de los diferentes tipos de vegetación.

2.5 Contaminación del aire por incendios forestales en México

Cada año la situación en calidad del aire en las ciudades localizadas cerca de regiones con altas frecuencias de incendios es seriamente afectada por el humo que se produce durante las quemas. Por ejemplo en las regiones boscosa cernas a la ciudad de México ocurren incendios forestales en el que el humo emitido incrementa la contaminación del aire propias de la zona urbana, el humo inhibe la visibilidad e incrementan los daños en la salud y condicionado a las condiciones meteorológicas local tiene sus efectos en la población (Bravo- Álvarez *et al*, 2006).

Otra Ciudad de la República de México que se ve perturbada en por la emisiones de humo, partículas y gases de efecto invernadero debido a incendios forestales es la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco. Cercana a la zona urbana de esta se ubica un área natural protegida en la que cada año los incendios son muy frecuentes y las emisiones que se producen son dispersadas a la zona provocando un deterioro de la calidad del aire (Bautista-Vicente, 2009). Estas ciudades no son las únicas perturbadas por las emisiones de los incendios forestales, pero sí de las que se tiene alguna referencia de investigación. Por las evidencias es posible afirmar que la atmosfera en México padece las consecuencias de las emisiones de gases, partículas, hollín y vapor de agua que producen los incendios de cada año.

2.5.1 Justificación

México es una región con alta frecuencia de incendios forestales. Estos eventos afectan extensa áreas de cobertura vegetal y causan diversos daños en la vegetación, suelo y atmósfera por los diversos contaminantes que se producen durante la quema. Existe poca información acerca de los incendios que ocurren en el país, las zonas con más frecuencia de ignición, los tipos de vegetación más afectadas y la cantidad de contaminantes, así como el impacto de estos en la atmósfera a diferentes escalas. Los desastres producidos en los ecosistemas forestales debido a incendios y las cantidades, desconocidas hasta ahora, de contaminantes producidos y emitidos a la atmósfera motivan los siguientes objetivos de este trabajo.

2.5.2 Objetivos

- Estimar la cantidad de CO₂, CO y CH₄ emitidos a la atmósfera debido a incendios forestales ocurridos en México desde 1999-2010. Se eligió este periodo por los registros históricos de incendios forestales a cargo de La CONAFOR y La CONABIO, además, es la información disponible para iniciar el trabajo de investigación.

- Identificar las regiones con más frecuencias de incendios forestales en el país. Con la finalidad de determinar los ecosistemas a más afectados.

- Construir un índice de riesgo de las emisiones de CO₂. Esto permitirá determinar medidas de prevención y vigilancia en los meses de mayor ocurrencia.

- Aplicar el Modelo WRF para realizar simulación numérica de la dispersión de CO para un evento de incendio ocurrido el 19 de marzo de 2003 en la región de máxima emisión de CO₂, estimar las concentraciones de CO y la dirección de la pluma de humo generada durante la quema.

Capítulo 3

Materiales y Metodologías aplicadas en este trabajo

Los materiales utilizados en las estimaciones de los contaminantes emitidos por incendios forestales en México son conjuntos de datos y la herramienta computacional, es decir, el modelo WRF. Las metodologías aplicadas en este trabajo describen el procesamiento de los datos para obtener los objetivos propuestos.

3.1 Materiales

a) Número de incendio forestal (**Figura 3.1b**) y área afectada (**Figura 3.1a**). Los datos se obtuvieron de reportes realizado por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) para el periodo de estudio.

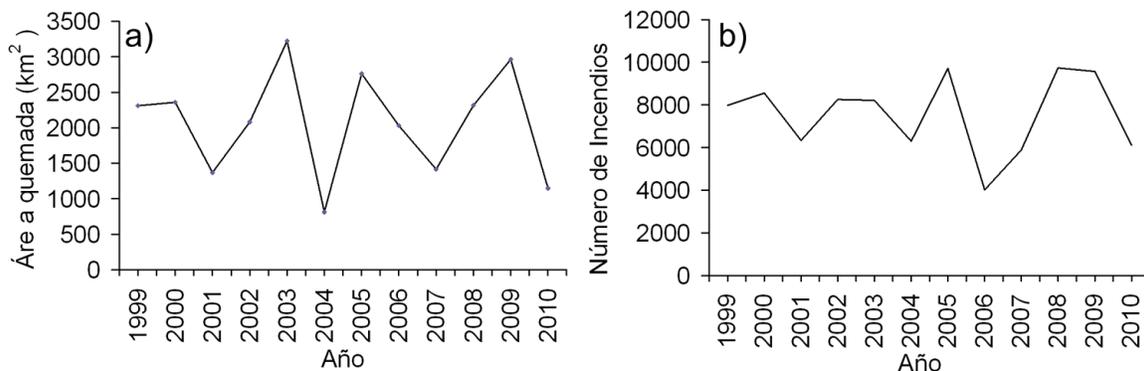


Figura 3.1. Datos de la CONAFOR para: a) Área afectada total y b) Número de incendios forestales totales documentados.

b) Número anual de puntos de calor para el periodo 1999-2010. Los datos se obtuvieron de los reportes diarios que emite la Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO). **La Figura 3.2**, muestra el número de puntos de calor para el periodo de estudio.

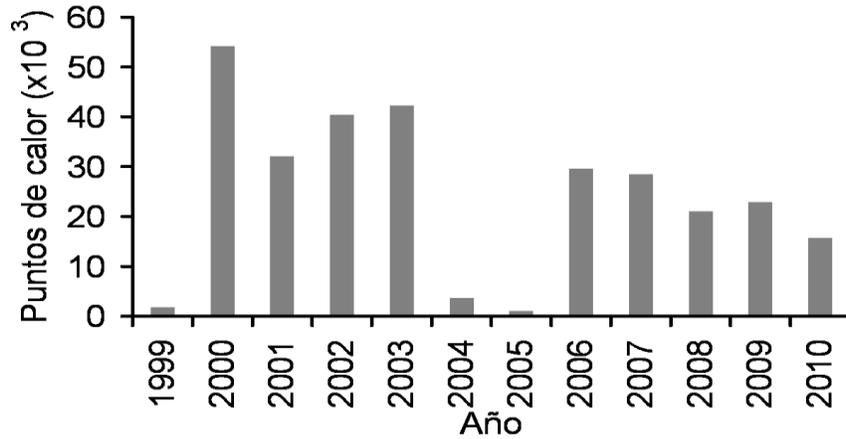


Figura 3.2. Número de puntos de calor para 1999-2010. Datos de CONABIO.

c) Datos de los diferentes tipos de vegetación de la República Mexicana (**Figura 3.3**). Esta base de datos fue actualizada en el año 2005 por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). Se utilizó esta base de datos para todo el periodo de estudio.

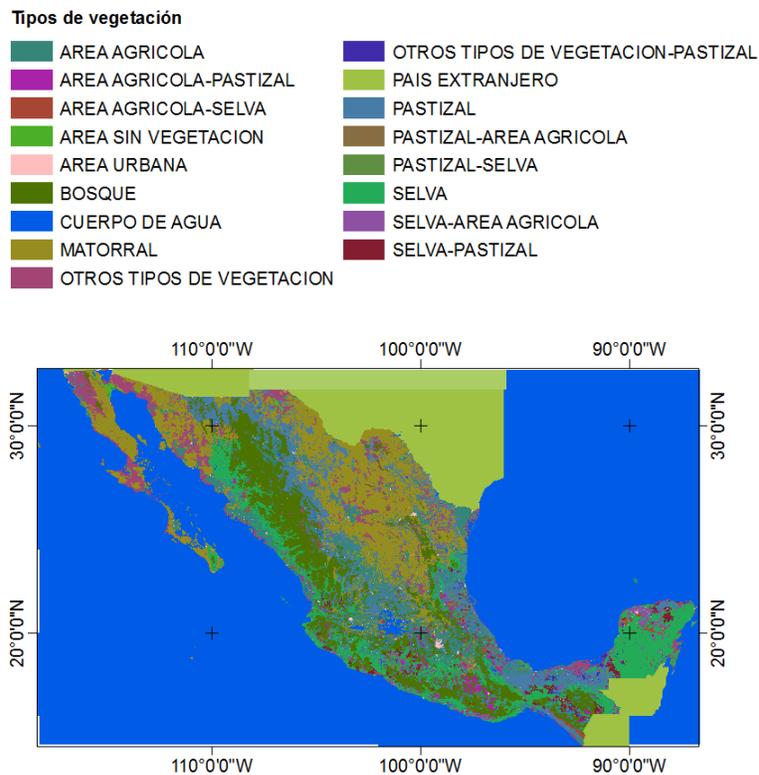


Figura 3.3. Tipos de vegetación de México. Datos por INEGI, 2005.

d) Datos de carga de biomasa y eficiencia de quema se tomaron de Levine *et al*, (2003) para seis tipos de vegetación (**Tabla 3.1**). Para el resto de las vegetaciones se estimaron valores promedios.

Tabla 3.1. Carga de biomasa y eficiencia de quema (tomado de Levine *et al*, 2003).

Tipo de Vegetación	Carga de biomasa (Ton/km ²)	Eficiencia de quema	Promedio de carga de biomasa (Ton/km ²)
Selva	5000-55000 ^a	0.20 ^a	30000
Bosques	5000-10000 ^a	0.30 ^a	7500
Vegetación agrícola	500-10000 ^a	0.40 ^a	5250
Pastizales	150-550 ^a	0.96 ^a	350
Matorrales	50-200 ^a	0.95 ^a	125
Pastizal-Agrícola	350-5250 ^b	0.68 ^b	2800
Selva-Pastizal	350-30000 ^b	0.58 ^b	15175
Agrícola-Selva	5250-30000 ^b	0.30 ^b	17625
Otros tipos de vegetación	150-500 ^a	0.95 ^a	325

^a tomado de levine,2003, ^b estimado de por nosotros.

3.2 Modelo de dispersión WRF

El modelo de Investigación y Predicción Meteorológica (por sus siglas en inglés WRF), es un sistema numérico diseñado para la investigación y aplicaciones operativas en la atmosfera-biosfera. El WRF es el resultado de la colaboración entre el Centro Nacional de Meso escala de Investigación Atmosférica (NCAR), de la División de Micro escala de Meteorología (DMM), la Administración Nacional Oceánica Atmosférica (NOAA), del Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP) y el Sistema Laboratorio de Investigación Terrestre (ESRL), el Departamento de Defensa de la fuerza Aérea y Agencia de tiempo (AFWA); el Laboratorio de Investigación Naval (NRL), el Centro de Análisis y Predicción de

Tormentas (CAPS) de la Universidad de Oklahoma, y la Administración Federal de Aviación (FAA) con la participación de científicos universitarios (Grell, 2005).

El modelo numérico WRF es una herramienta computacional que puede utilizarse en la investigación y la enseñanza. Es adecuado para un amplio abanico de escalas de aplicación que van desde simulaciones globales hasta locales (Ver **Figura 3.4**). Para más información del modelo WRF véase (ARW, 2014).

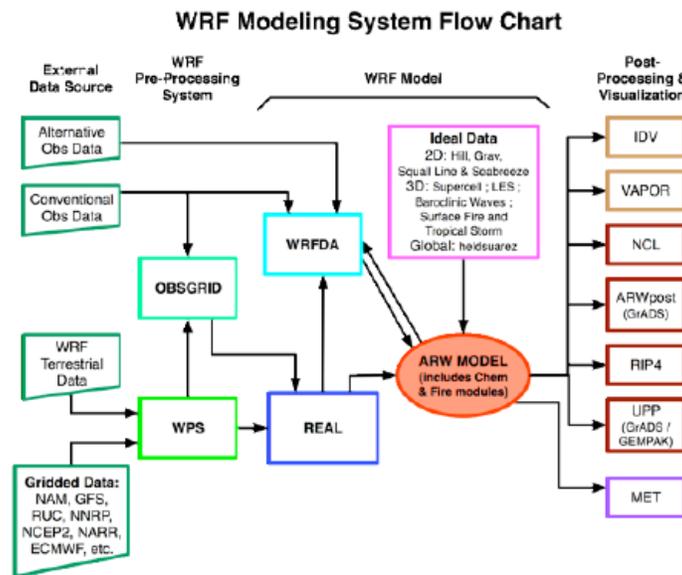


Figura 3.4. Sistema de modelación con el WRF (WRF, 2014).

En el sistema de modelación del WRF los paquetes principales con los que se trabajan son: Sistema de preprocesamiento (WRF-WPS). Este se compone de tres programas cuya función es colectiva. Preparar la entrada al programa real para simulaciones de datos real. Cada uno de los programas realiza una etapa de la preparación para la modelación. **Geogrid** define dominio de interés e interpola datos geográficos estáticas a los siguientes módulos. **Ungrid** extrae campos meteorológicos de los datos que so proporcionados por el usuario y **metgrid** que interpola horizontalmente los campos meteorológicos extraídos por **ungrid** al modelo de las redes definidas por **geogrid** (**Figura 3.5**).

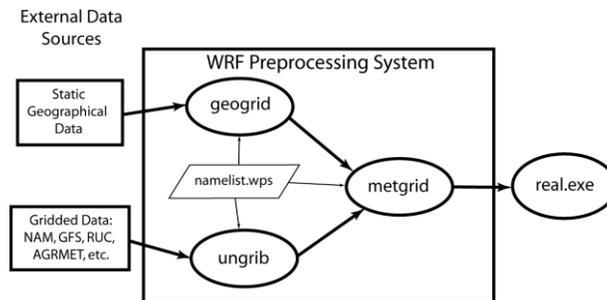


Figura 3.5. Flujos de datos con el programa de WPS (ARW-2014).

3.3 ARW solver y post procesamientos y herramientas de visualización

Este es el componente clave del sistema de modelado, que se compone de varios programas de inicialización para simulaciones idealizadas, y simulaciones con datos reales y programa de integración numérica, resuelve la dinámica de la física atmosférica junto con otros componentes del sistema de WRF y es utilizado en la producción de una simulación (WRF-Var) (ARW, 2014).

3.4 Modelo WRF_CHEM

El modelo WRF-CHEM es la parte más avanzada de la Investigación Meteorológica y Predicción del modelo WRF, este módulo fue el que se utilizó en este trabajo. El esquema de paquetes computacionales para las diversas aplicaciones del WRF-CHEM se en listan a continuación:

- Deposición seca junto con esquema de suelo y vegetación.
- Cuatro opciones para emisiones biogénicas.
- Tres opciones para emisiones antropogénicas.
- Datos de emisiones globales RETRO Y EDGAR.
- El usuario puede proveer las emisiones antropogénicas utilizando el inventario de Estados Unidos (NEI-05).
- Incluyen varias opciones de mecanismo químico en fase gas.
- Tres opciones para esquema de fotólisis.
- Cinco opciones para esquema de aerosol.
- Efecto directo de aerosol a través de la interacción con la radiación atmosférica, la fotólisis, y rutinas de microfísica.
- Una opción para el transporte del trazador pasivo de gases de efecto

invernadero.

El usuario deberá proporcionar los datos de las emisiones en su propio dominio en el formato de archivo adecuado para el WRF-CHEM en esta opción.

Lo más importante en este caso de estudio, se incluye un modelo de elevación de la pluma para el tratamiento de las emisiones de los incendios forestales.

La parte química del modelo WRF-CHEM ha sido construido siguiendo la metodología de construcción utilizado en el modelos WRF, por lo tanto, la descripción del software WRF se puede ver en la Guía del usuario del WRF (Capítulo 7) para obtener información adicional al respecto. Se debe tener cuidado en la selección de las parametrizaciones que se utiliza con los esquemas de la química, ya que no todas las parametrizaciones de la física funciona con la química activa.

3.4.1 Aplicaciones en el sistema de modelación con el WRF-CHEM

- Predicción y simulación de la meteorología a nivel local y regional.
- Modelación de la dispersión de elementos constituyentes atmosféricos.
- Evaluación de la calidad del aire, de la dispersión con plena interacción de especies química con predicción de O₃ y de la radiación ultra violeta, así como partículas en suspensión (PM).
- Estudios de procesos que son importantes en el problema del cambio climático global, por ejemplo, los procesos de reacción química de gases de efecto invernadero emitidos por fuentes antropogénicas.

El sistema de modelación con el WRF_CHEM es similar al modelo WRF. La diferencia entre ambos modelos es la parte química que se considera en el modelo WRF_CHEM. Para que éste realice los procesos relacionados con la química se necesita que el usuario proporcione datos de emisiones del dominio de interés en el formato adecuado para ser leído por el modelo.

Los datos de emisiones se pueden proporcionar desde el primer módulo del

sistema de modelación, que sería el WPS (solo para campos de emisión de polvo), para el caso de la quema de biomasa o emisiones biogénicas pueden ser leídas durante la inicialización del módulo dinámico de real.exe.

El grupo de investigadores que han colaborada en el desarrollo del modelo WRF-CHEM han proporcionado en un intento de ayudar al usuario, algunos programas que permiten generar los archivos de datos de entrada de emisiones, lo cual puede ser la parte más compleja para un dominio en particular dentro de la República de México.

En este estudio se trabajó con el modelo WRF-CHEM para modelar una pluma de contaminantes producida por incendios forestales en el área donde los valores de las emisiones de dióxido de carbono son más altos de acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio.

3.5 Método de estimación de los contaminantes CO₂, CO y CH₄

En el cálculo de la cantidad de contaminantes emitidos a la atmósfera por incendios forestales ocurridos durante el periodo 1999-2010 se estimaron de acuerdo al proceso descrito a continuación.

Utilizando la información de puntos de calor reportados por la CONABIO (**Figura 3.2**) y la información de los tipos de vegetación de México (**Figura 3.3**), se clasificaron los puntos de calor de acuerdo al tipo de vegetación en la que se localizaron estos puntos.

Se estimaron promedios de carga de biomasa y eficiencia de quema para los diferentes tipos de vegetación. Para obtener los promedios se aplicaron los datos de la **Tabla 3.1**.

Seguidamente, de los datos que registra La CONAFOR se estimó un promedio anual de área quemada. Este promedio, se asignó a cada punto de calor como dato de área quemada.

Finalmente, para la estimación del CO₂ y utilizando los resultados de los parámetros anteriores, se aplicó la ecuación propuesta por Seiler y Crutzen *et al*, 1980) a cada punto de calor para estimar la cantidad de dióxido de carbono (CO₂) emitido.

$$\text{EQ (1)} \quad \text{CO}_2(x, y) = \beta \times C(x, y) \text{ [Mg]}$$

Dónde: CO₂(x, y) es la cantidad de dióxido de carbono emitido por cada punto de calor (incendio forestal) (Mg =Mega gramos). $\beta = 0.90$ es la fracción de carbón emitido en forma CO₂ para vegetación tropical (Levine, 2003). $C(x, y) = \alpha \cdot M(x, y)$ donde, $M(x, y) = A \times B \times E$ (A=área quemada (km²), B=carga de biomasa quemada (Mg/km²) y E=eficiencia de quema); $\alpha = 0.45$ es el porcentaje de carbón contenido en la biomasa (Levine, 2003). Los puntos (x, y) son la posición geográfica de incendios forestales ocurridos durante el periodo 1999-2010.

Una vez que se conoce las emisiones de CO₂ por la quema de biomasa, es posible estimar de la misma forma la cantidad de cualquier otro contaminante producida durante un incendio.

Por lo que, para estimar la cantidad de Monóxido de Carbono (CO) y Metano (CH₄) producidos en los incendios forestales del periodo estudiado se utilizaron los valores de CO₂ estimados anteriormente. Para ello se aplicó la siguiente ecuación. $M(X_i) = ER(X_i)M(\text{CO}_2)$ (ton de X_i).

Donde X_i puede ser CO, CH₄ y M (CO₂) es la cantidad de contaminante de dióxido de carbono calculado en la ecuación EQ (1). ER (X_i) es coeficiente de emisión de cada contaminante a estimar. Para CO se tomó ER=8.5 y para CH₄ ER=0.32. De acuerdo a los valores reportados Levine *et al.*, 2003.

Finalizado el cálculo de emisión de CO₂, CO y CH₄ para cada año y por tipo de vegetación, se integraron los resultados en una sola base de datos. Este resultado se trabajó en un sistema de información geográfica (SIG) para obtener la distribución de las emisiones sobre el territorio Mexicano.

Finalmente se efectuó la suma de emisiones por año para obtener el total de emisiones de todo el periodo por tipo de contaminante.

3.6 Metodología para construir el mapa de riesgo de emisiones de CO₂ y frecuencias de incendios

Con los resultados obtenidos por la metodología anterior, se procesó la información de los valores de emisión de CO₂ en un sistema de información geográfica (SIG).

En el SIG se diseñó una tabla de datos con los valores de emisión de CO₂ incluyendo los valores de todo el periodo de estudio. Con la tabla de datos, se construyó una malla de 0.1° x 0.1° de tamaño de celda. El tamaño de la malla abarca el área de estudio de este trabajo. Se localizó las regiones con valores más alto de emisiones de CO₂ y se identificó la celda con mayor emisiones para todo el ciclo estudiado. El índice de riesgo se obtuvo al dividir todos los valores entre el valor más grande. Para el mapa de frecuencia se siguen los mismos pasos.

3.7 Metodología de la modelación de la dispersión de humo producido por incendios forestales en la celda de mayor emisión

Se adaptó el modelo WRF para las condiciones del área de interés, se eligió un dominio que contuvieran a la celda en la que se presente los valores máximos de contaminantes producidos por los incendios forestales que ocurren en esa zona (usando el módulo WPS del modelo WRF) (Ver **Figura 3.6**).

La resolución del dominio modelado fue de 3 km x3 km con 240x209 puntos de malla. La coordenada central del dominio fue 18.852 latitud y -90.205 longitud.

(Estos datos de resolución no son los mismos que la resolución de la malla en usado en la construcción del mapa de índice de emisiones que se mostrará más adelante de este trabajo).

La región modelada se localiza en el estado de Campeche de la Republica de México.

Una simulación de diagnóstico se realizó para el día 19 de marzo del año 2003. En ese periodo se presentó un evento importante de incendios simultáneos en la región crítica de emisiones de CO₂ de acuerdo al índice de riesgo que se estimó en este trabajo.. Los datos meteorológicos se integraron con los datos que caracterizan el terreno sobre el área de interés (usando *ungrid*, *metgrid* y *real.exe*).

Se construyeron los archivos de datos de las emisiones del contaminante a modelar y se integró en el módulo de emisiones del WRF-CHEM.

En la construcción de los archivos de datos del contaminante se utilizó un algoritmo escrito en lenguaje fortran: Emis.v03. Este algoritmo fue desarrollado por la NOAA y está disponible al público en:

http://filemare.com/es.mx/browse/137.75.133.213/divisions/taq/emissions_data_2005/emiss_v03.F_08apr09.

En el programa emis_v03 se indicaron las coordenadas geográficas correspondientes a las posiciones de los incendios forestales y la cantidad de contaminante producidas por cada incendio y que para este caso fue el monóxido de carbono (CO).

Los datos que se utilizaron como datos de contaminantes son los que se calcularon con la metodología explicada en sección **3.6**.

Los resultados obtenidos con emis_v03 se utilizaron para inicializar *real.exe* (véase la **Figura 3.6**).

Se graficaron las salidas de la modelación para la dispersión de CO y para los parámetros de la meteorología (temperatura y viento).

Se obtuvo la gráfica que muestra la dispersión de la pluma de humo para el incendio seleccionado e unidades de ppm (véase Resultados y Discusión).

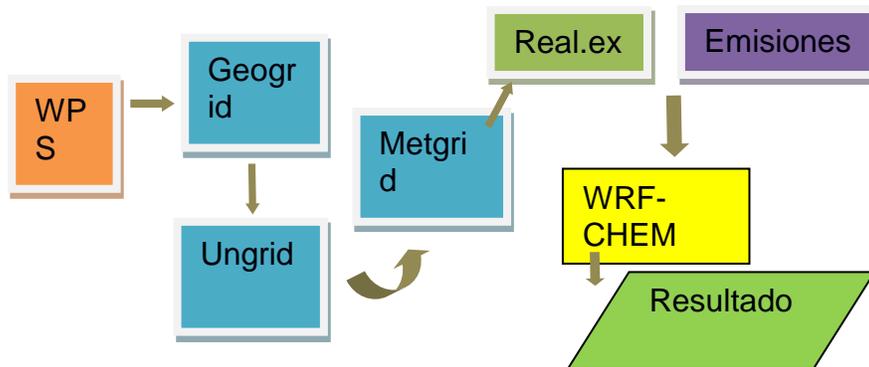


Figura 3.6. Pasos para realizar la modelación con el WRF-CHEM.

Capítulo 4

En esta parte se presentan los resultados obtenidos de acuerdo a cada objetivo propuesto en el capítulo dos de esta tesis. En este capítulo se muestran los resultados de la estimación de dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) y metano (CH_4) emitido a la atmósfera debido a incendios forestales ocurridos en México en el periodo 1999-2010. También se muestran resultados de una modelación numérica de la pluma de aerosoles generados por incendios y mapas de riesgo por emisiones de CO_2 . Posteriormente se muestran resultados que provienen del análisis realizado a los conjuntos de datos de puntos de calor y a la información de uso de suelo y vegetación. Es importante hacer notar que en este trabajo los puntos de calor serán considerados como incendios. Esto se basa en que la CONABIO realiza un procedimiento de eliminación de puntos de calor que no alcanzan la categoría de incendio.

4.1 Estimación de Emisiones

En la primera parte de este capítulo se muestran los resultados de la estimación de dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) y metano (CH_4) emitido a la atmósfera debido a incendios forestales ocurridos en México desde 1999-2010. Se realizó la separación en polígonos en trece principales tipos de vegetación para México utilizando el mapa de uso de suelo y vegetación. La **Figura 4.1** muestra los polígonos de cada cobertura vegetal.

En la **Figura 4.1** se muestran los polígonos por tipos de vegetación en México. En términos de porcentaje territorial la selva ocupa 6.8%, los bosques 5.5%, pastizales 7.3% y matorrales 3.7%, lo más importante de este análisis es que nos permitió realizar la clasificación de puntos de calor por tipo de vegetación. Una vez realizada la clasificación de la vegetación se puede hacer una distribución de los puntos de calor de los datos de 1999 al 2010 por tipo de vegetación (**Figura 4.2a**).

La **Figura 4.2a** muestra los puntos de calor desde 1999-2010 localizados en cada polígono de las vegetaciones. El número de puntos de calor que se localizaron en los polígonos de cada vegetación se presentan en la **Figura 4.2b**.

Se puede observar que la mayor parte de los incendios forestales se localizaron en los polígonos correspondientes a selva, bosque, pastizal, regiones agrícolas y matorrales distribuidos principalmente en función de la superficie que ocupa cada una de las coberturas. (**Figura 4.2b**). Es interesante notar la disminución de puntos en el periodo de 2004 y 2005. Los datos de precipitación muestran un incremento de la precipitación total anual para México en 2003 aun que mayormente localizada en la región del Sureste del país.

Aunque la presencia de incendios forestales tiene varios factores que los originan, como la caída de un rayo, en épocas de sequías y procesos del propio ecosistema, más el 90% se debe a descuidos y a actividades humanas.

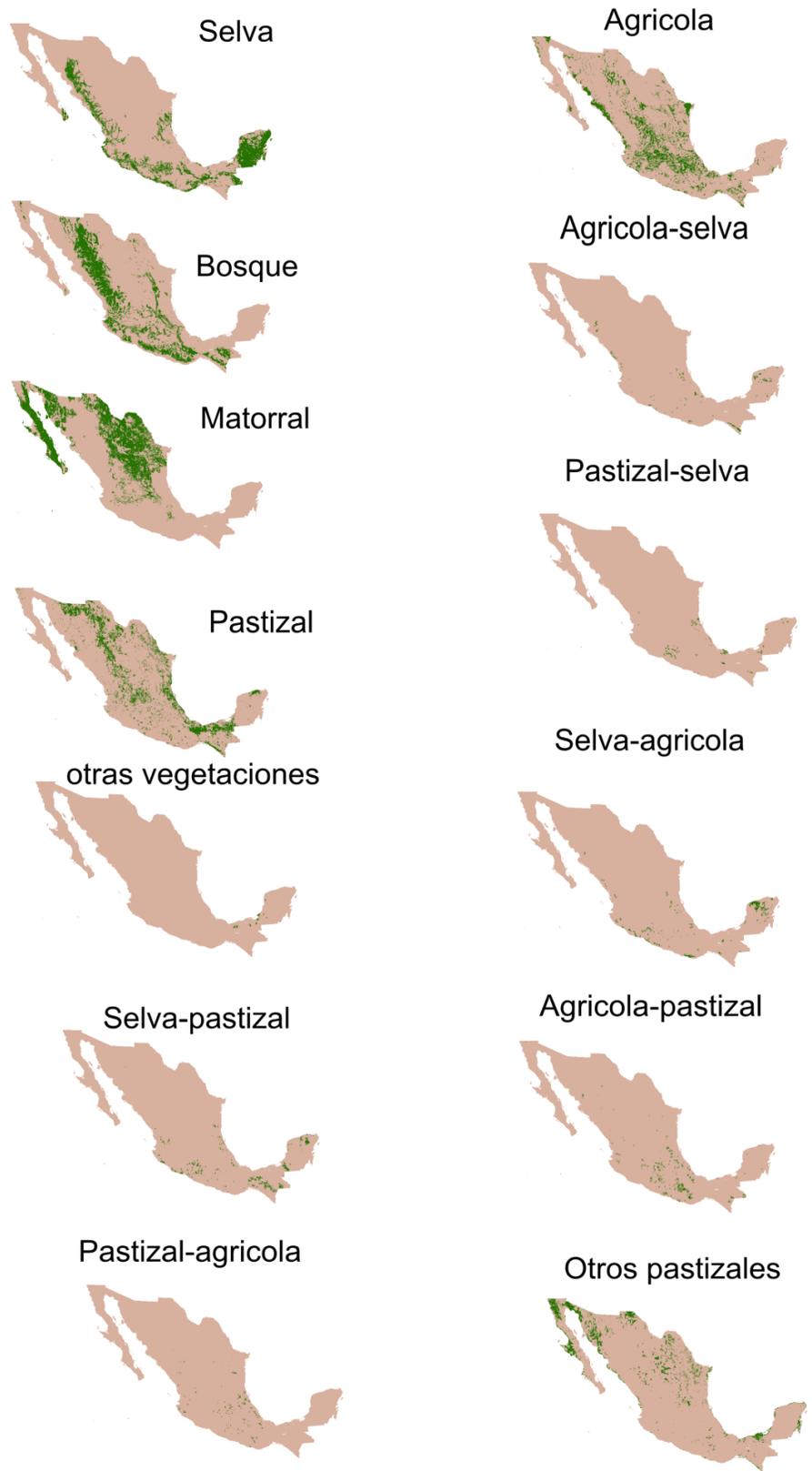


Figura 4.1. Polígono de los tipos de vegetación en México. Datos por INEGI, 2005

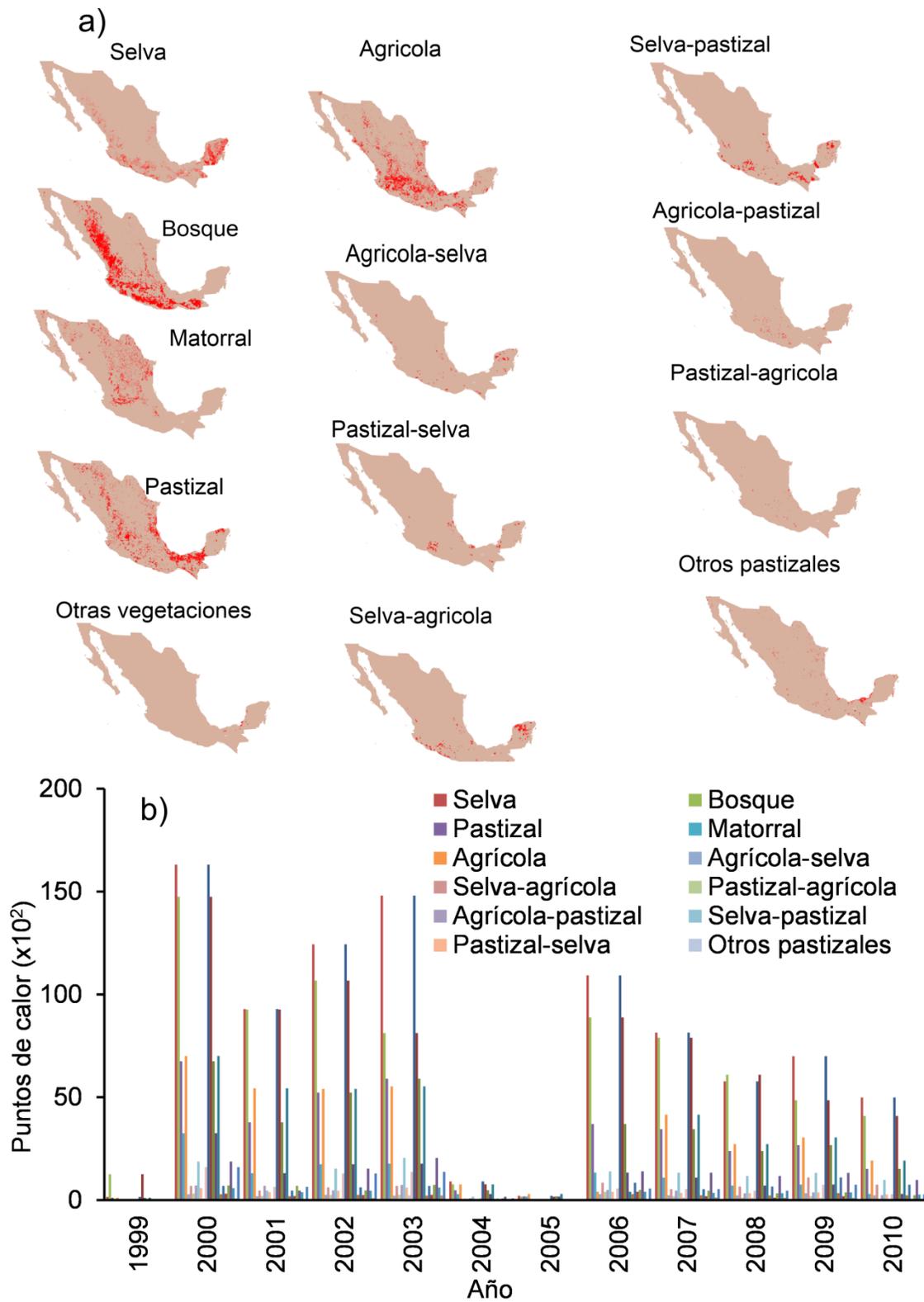


Figura 4.2.a) Puntos de calor en cada área de vegetación y **b)** puntos de calor por tipo de vegetación.

La problemática de los incendios forestales afecta todos los grupos de vegetación como se muestra en la **Figura 4.2a**. Los incendios ocurren cada año en la época de mayor estiaje que regularmente ocurre durante Noviembre a Mayo y algunos años se extiende hasta agosto. Los incendios producen y emiten contaminantes que impactan la composición de la atmósfera. Además, de los gases que se producen e impactan la calidad del aire durante los incendios forestales, no existe información oficial referente a la pérdida de cobertura vegetal de cada uno de los ecosistemas debido a incendios.

El registro de incendios forestales sólo considera el total de áreas afectadas y en forma muy general indica la vegetación que se quema, mas no a un nivel de detalle como para hacer una evaluación de la cantidad de pérdida de vegetación que se quema a nivel nacional (CONAFOR). Para un trabajo a futuro sería importante estimar la vegetación que se pierde anualmente por incendios forestales en cada uno de los ecosistemas. Esto permitirá conocer la relación entre en número de incendios forestales y la fragmentación de los ecosistemas afectados y pérdida de vegetación en México. La clasificación de los incendios por tipo de vegetación es un paso relevante en la metodología desarrollada para realizar las estimaciones de los contaminantes que se propusieron en los objetivos de este trabajo. La clasificación de los puntos de calor por tipo de vegetación se hizo para cada año (ver Anexos de Figuras).

4.2 Área quemada

Uno de los problemas con los que se tuvo que confrontar para hacer la estimación de las emisiones de aerosoles por incendios forestales fue el siguiente: a través del sensor satelital MODIS se detectan los llamados puntos de calor, el problema es que se da la posición del punto de calor pero no se da información sobre el área afectada. Por otro lado, la CONAFOR realiza la documentación de algunos miles de incendios pero sin nunca alcanzar el número total de incendios. En esta documentación la CONAFOR sólo da a conocer el número total de área afectada y

el número total de incendios documentados por estado de la República Mexicana. Por este motivo, usando la información de los incendios documentados por la CONAFOR se calculó un área promedio anual por incendio. El número total de incendios documentados llegó a ser del orden de 10 000 con un área afectada total máxima de 3 000 km² por año.

La **Figura 4.3a** muestra el promedio de área quemada que resultó de obtener el área promedio. Los valores promedios se obtuvieron de los datos que registra la CONAFOR del número de incendio entre área quemada. Estos promedios anuales se asignaron a cada punto de calor (considerado cada punto de calor como un incendio), después, se estimó el área total anual quemada (**ver Figura 4.3b**). Las estimaciones indicaron que más de 16 000 km² fueron devastados por incendios forestales, por ejemplo en el año 2003. Esta área afectada corresponde aproximadamente al 0.8 % de la superficie total de México. Esta cantidad es preocupante y es un indicador de la seriedad del problema de los incendios forestales.

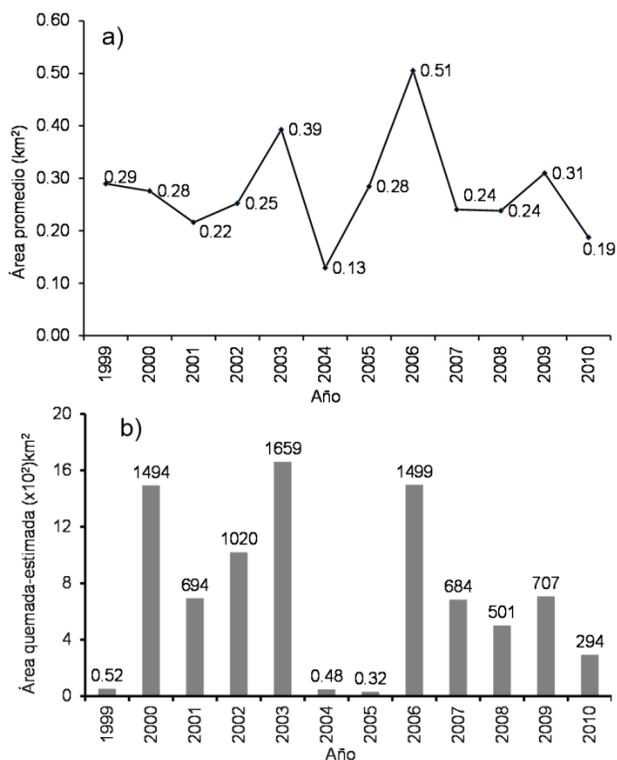


Figura 4.3. a) Área promedio quemada. b) área total anual quemada.

El área quemada (**Figura 4.3a**) es un parámetro clave para realizar la estimación de emisiones de CO₂. Se usó el promedio anual de área quemada, éste se calculó de los registros históricos de la CONAFOR para cada año desde 1999-2010. El año 2006 fue el año con mayor promedio de área quemada a nivel nacional y el menor promedio fue en el año 2004. Esto tiene que ver con la variabilidad en el número de incendios año con año, esta variabilidad, está relacionado con las actividades humanas y factores climáticos (épocas de sequías, presencia de huracanes y disponibilidad de combustible a ser quemado).

El promedio anual de área quemada se asignó como el área quemada por cada punto de calor en los diferentes ecosistemas y para cada año.

El número promedio anual de área quemada fue necesario estimarlo para poder usar en la ecuación propuesta de Seiler y Crutzen *et al* (1980) y, de esta manera poder aplicar la ecuación que permite calcular la cantidad de dióxido de carbono producido por incendios forestales. Debido a la falta de información del área total quemada por incendios forestales, se usó el área afectada por estado de la República en los registros de la CONAFOR aunque sin una referencia geográfica en longitud y latitud de los incendios documentados. Con la estimación del área promedio anual se complementaron bien las bases de datos de incendios forestales registradas por CONAFOR y CONABIO, y así con esta nueva información se facilitó el desarrollo de la metodología y la aplicación de la ecuación de Seiler y Crutzen *et al.*, (1980) para hacer estimaciones de emisiones.

La **Figura 4.3b** muestra los resultados del área total quemada en el periodo de 1999-2010 la cual es de aproximadamente 86857 km². Eso indica que se ha quemado en doce años cerca del 22% del territorio de México. El año con mayor área promedio quemada fue el año 2006, pero debido al número de puntos de calor el año 2003 es el que tiene el mayor número de área total quemada. Lo mismo explica el valor mínimo entre los años 2004 y 2005, siendo este último el año con menor área total quemada en el periodo. Esta información exhibe la importancia del control de los incendios forestales en la época de mayor

ocurrencia, ya que sus efectos se reflejan en la fragmentación de los ecosistemas mexicanos.

4.3 Estimación de las emisiones de dióxido de carbono

Los incendios forestales ocurren prácticamente en todo el país. Por tanto, es de interés conocer como la distribución de incendios se refleja en las emisiones de gases de efecto invernadero. Aplicando la metodología descrita en el capítulo 3, con la información generada de polígonos de vegetación, biomasa por km² en cada tipo de vegetación, número de incendios totales anuales y área promedio anual permitieron estimar las emisiones de CO₂ y su distribución en México. La **Figura 4.4** presenta la distribución geográfica de emisiones anuales de CO₂ producida por los incendios forestales ocurridos en los tipos de vegetación de México. En la estimación, se usaron valores promedios de los datos que se muestran en la **Tabla 3.1** (Capítulo 3) y se aplicó la ecuación EQ (1) (ver capítulo 3) y los resultados de la **Figura 4.3a**. Las emisiones totales anuales de CO₂ fueron muy variables en el periodo 1999-2010. El rango de variación fue de 0.053 Tg en 1999 a 23.9 Tg en el 2003. Es fácil distinguir que las zonas más afectadas por las emisiones de CO₂ son la región de la Sierra Madre Occidental, la Sierra Madre del Sur, la Sierra Madre Oriental, el Eje Neovolcánico y sobre todo la península de Yucatán, donde prácticamente en todos los años fue afectada por fuertes emisiones.

La distribución espacial de emisiones de dióxido de carbono tienen la misma posición de los incendios forestales ocurridos durante el periodo 1999-2010 y su magnitud está en función del tipo de vegetación debido a la carga de biomasa estimada (**Figura 4.4**). Aunque que la ocurrencia de incendios forestales dependen de varios factores y que en este trabajo no fueron investigados a detalle (por ejemplo: aspectos climáticos y prácticas de quemas agrícolas), y solo se desarrolló una metodología para estimar la cantidad de dióxido de carbono producido por incendios.

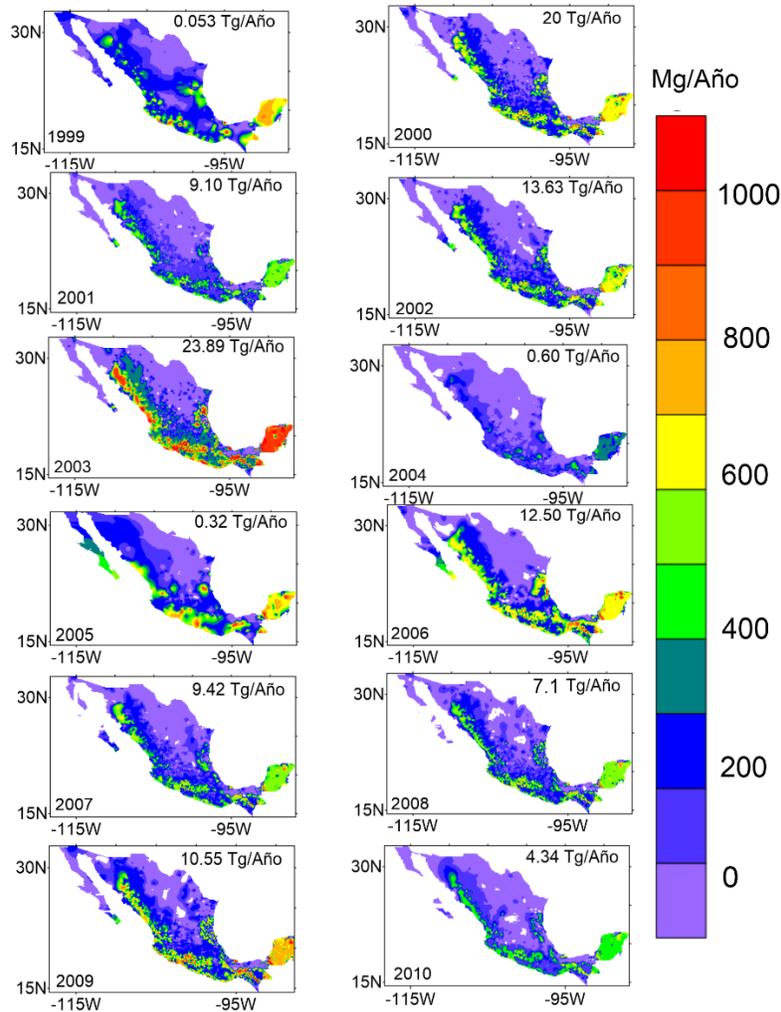


Figura 4.4. Distribución geográfica de las emisiones anuales de CO₂ producida por incendios forestales ocurridos durante el período 1999-2010.

En esta investigación se trabajó con datos disponibles y necesarios para realizar el cálculo de las emisiones de CO₂ y no con los factores que favorecen los incendios. Es importante considerar que los resultados solo son aproximaciones estimadas ya que para tener resultados más exactos se requiere realizar estudios de campo y de laboratorio. Por otro lado, este es el primer aporte a nivel nacional en la estimación de la cantidad de emisiones de CO₂ producido por incendios en México. Una forma de validar es a través de una comparación de resultados obtenidos en este tesis y otro trabajo realizado con una metodología similar, pero haciendo usos de la misma ecuación de Seiler y Crutzen.

En cada mapa de la **Figura 4.4** se muestra la cantidad producida anualmente de CO₂ en Tera gramos (Tg). En una escala de color para todos los mapas, se muestra la cantidad de CO₂ para una celda de 0.1°x0.1° (~20km x 20km) en unidades de Mega gramos por Año (Mg/Año) y un total acumulado durante los doce años que abarca el periodo 1999-2010 de 112 Tg.

En la estimación de emisiones anuales de dióxido de carbono se obtuvo un rango de 0.053-23.89 Tg durante los doce años del periodo estudiado y un valor acumulado de 112 Tg. La ecuación de Seiler y Crutzen *et al.*, (1980) aplicada por Levine *et al.*, (2000), para algunas regiones que fueron quemadas por incendios forestales en 1998 en Kalimantan y Sumatra obtuvo: 191.435 Tg de dióxido de carbono. En ambos trabajos se aplicó la misma ecuación y valores promedios de carga de biomasa (mostrados en la **Tabla 3.1**). Levine *et al.*, (2000) obtuvo el dato de área quemada de imágenes spot, en este trabajo se tomó como dato de área quemada los resultados mostrado en la **Figura 4.3a** para trece tipos de vegetación.

Aun con las limitaciones que se presentaron para hacer la estimación y considerando que pueden los resultados estar subestimados es importante reconocer que los valor total obtenido de la cantidad de CO₂ está dentro de los rangos de otros estudios (Kasischke *et al.*, 2003; Hoelzemann *et al.*, 2004 y Levine *et al.*, 2000).

Los valores de emisiones de CO₂ se distribuyen sobre la región de ecosistemas con más incendios; bosque, selva, pastizales y zonas de uso agrícola. Hacia la región sur y sur-este se localizan los valores máximos de emisiones CO₂.

Siendo esta sustancia uno de los gases de efecto invernadero resulta interesante conocer el porcentaje de emisiones de CO₂ que ha producido cada grupo vegetativo durante los incendios del ciclo 1999-2010.

4.4 Porcentaje de emisiones de dióxido de carbono por tipo de vegetación

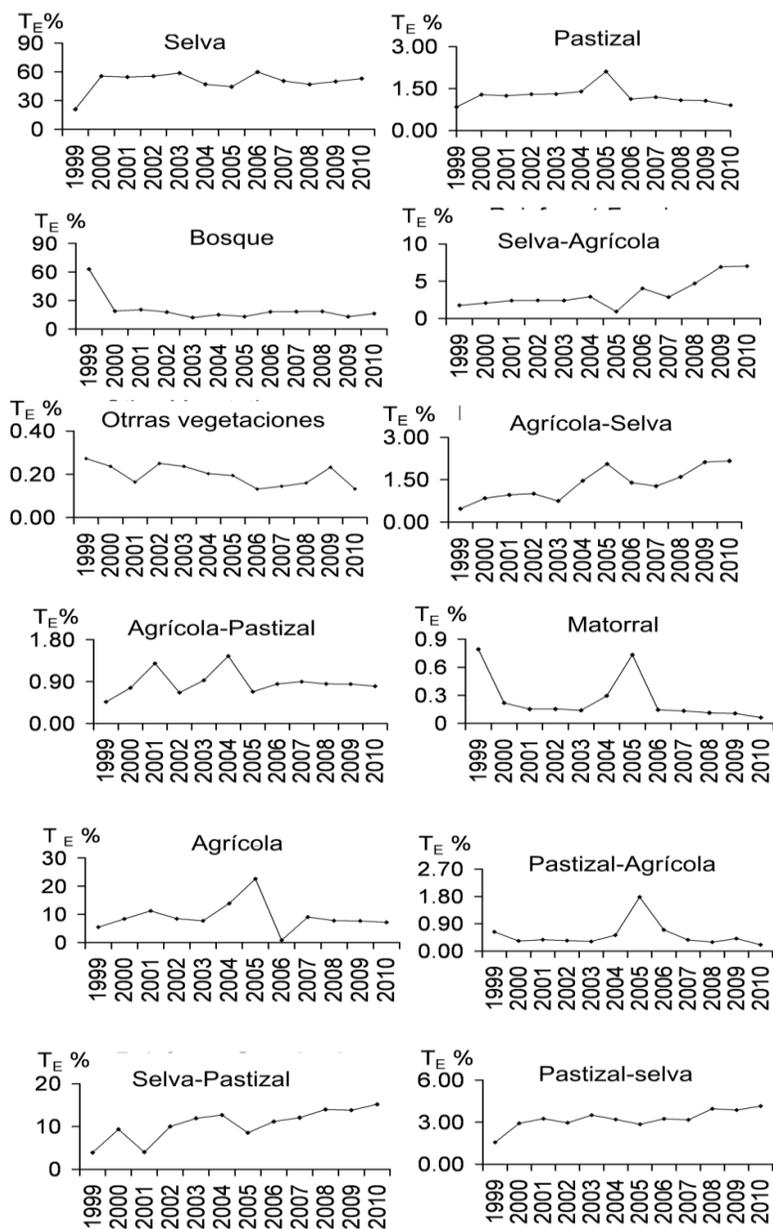


Figura 4.5. Porcentajes de emisión de CO₂ por cada tipo de vegetación

(T_E = Total Emitido).

La forma en que se llevó a cabo el cálculo permite analizar de manera más detallada las emisiones en cada tipo de vegetación. De esta manera es posible observar donde ocurren aumentos o disminuciones en las cantidades anuales

totales de CO₂. En la **Figura 4.5**, se muestran los porcentajes de emisiones de CO₂ por cada tipo de vegetación. Es interesante observar que en el tipo de vegetación puramente selva no hay cambios importantes en las emisiones totales anuales. Sin embargo en agrícola-selva, pastizal-selva y selva-pastizal hay una tendencia a un incremento en las emisiones. Esto sugiere que en donde la selva interactúa con acciones antropogénicas hay una mayor tendencia a un número mayor de incendios. Las regiones boscosas no muestran crecimiento en el porcentaje, lo mismo ocurre en matorral, donde sólo a manera de excepción en el año 2005 hubo un incremento puntual (**Figura 4.5**).

Las emisiones con valores máximos corresponden a la vegetación de bosque, selva y zonas agrícolas. Alrededor del 75% de las emisiones de CO₂ que provienen de ese tipo de vegetación que producen una gran carga de biomasa y a demás son regiones vulnerables a perturbación por los humanos en la práctica de tumba y quema de vegetación. El otro 25% de emisiones provienen áreas de selva y agrícola. El mayor porcentaje de emisiones provienen de la quema de vegetación de selva, el cual tiene un rango de 25%- 35%, es decir, entre 39 y 28 Tg de CO₂, manteniendo un promedio casi constante anual. La quema de vegetación de bosque mantiene un ritmo constante entre 20% y 25%. Es decir, entre 28 y 22.4 Tg de CO₂ y para las vegetaciones de regiones de uso agrícolas un rango de 8%-10%, es decir, 8.9 a 11.2 Tg de CO₂ y aproximadamente el 2.5% proviene del retos de las vegetaciones y en las que las emisiones de matorral, pastizal se mantienen casi constantes, lo que puede significar que son quemadas controladas. De este cálculo se estima que durante 12 años se ha liberado a la atmósfera cerca de 112 Tg de CO₂. Aunque este elemento es de vital importancia para el sostenimiento de la vida en el planeta, en las últimas décadas se ha convertido en ser el principal gas de efecto invernadero antropogénico. En forma acumulada en la atmósfera este gas favorece el calentamiento global, altera el sistema climático en los ecosistemas que están cerca de las zonas quemadas y propicia un círculo de concurrencias de emisiones de CO₂ debido a las grandes cantidades de biomasa quemada en los todos los ecosistemas de México.

4.5 Estimación de emisiones de monóxido de carbono

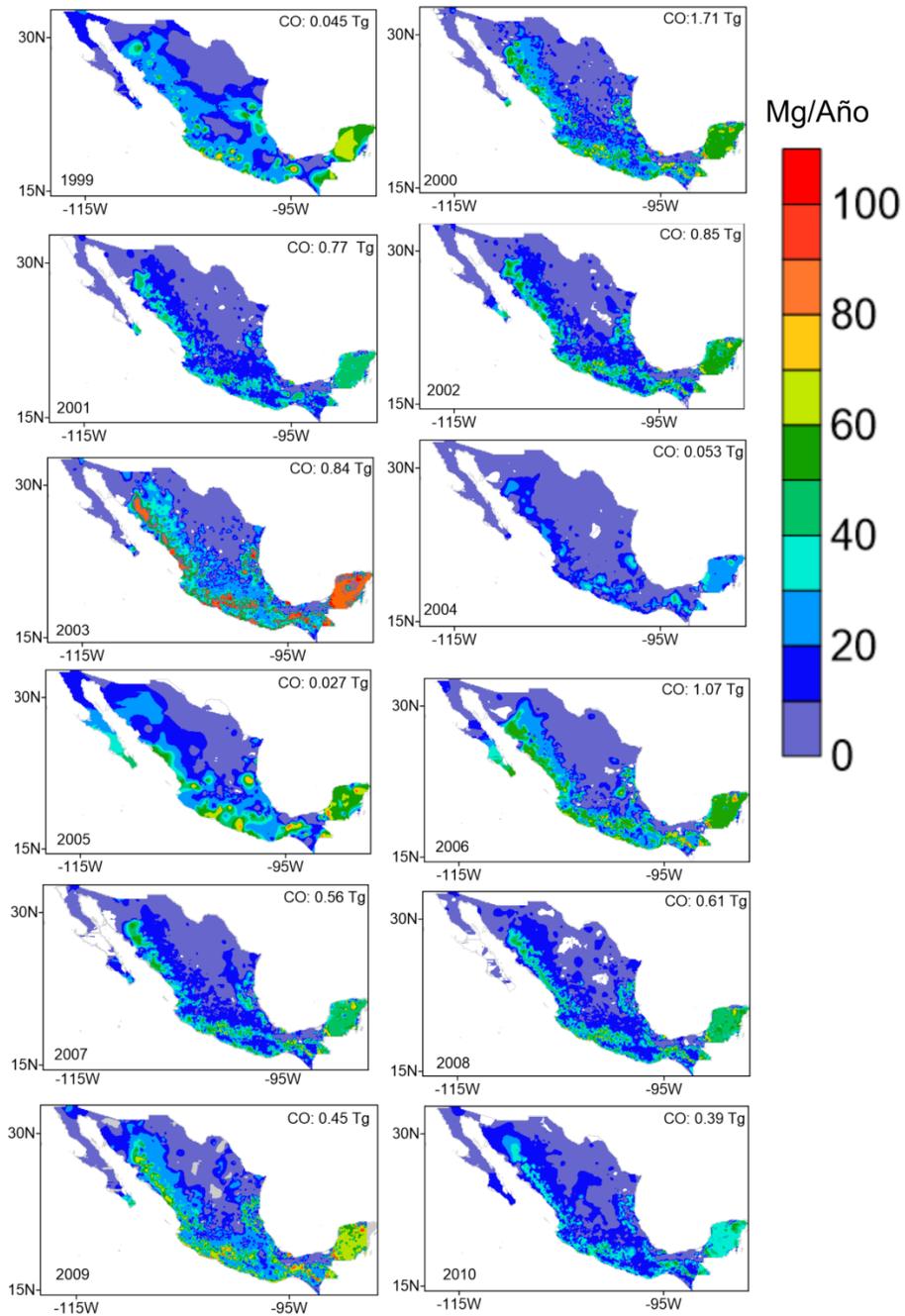


Figura 4.6. Distribución de emisiones totales anuales de CO por incendios forestales en México durante 1999-2010.

La metodología presentada en el capítulo 3 permite estimar también las emisiones de CO las cuales también representan las del CO₂ pero con otra escala de concentraciones.

La **Figura 4.6** presenta la estimación de CO. En este cálculo se aplicó la M (X_i) (ver capítulo 3) y el coeficiente de emisión para el monóxido de carbono (CO) con un valor de 8.5, el total acumulado durante periodo fue de 5.8 Tg. Nuevamente, la región de la península de Yucatán fue la más afectada, particularmente en el año 2003.

La distribución espacial de emisiones de dióxido de carbono representa la mayor incidencia de incendios forestales ocurridos durante el periodo 1999-2010 (**Figura 4.4**).

La emisión de monóxido de carbono debido a incendio forestal tiene relevancia debido a los daños que causa a la salud de las personas cuando se exponen por un tiempo prolongado a concentraciones elevadas a este contaminante. Las moléculas de CO tienen la capacidad de unirse a la hemoglobina, lo cual provoca una reducción significativa en la oxigenación del organismo lo que afecta el funcionamiento del corazón, del cerebro, las plaquetas y del endotelio de los vasos sanguíneos (Richard *et al.*, 1994). Los límites permisibles diarios de exposición a CO de acuerdo a la NOM es de 11ppm una vez al año. Durante el período 1999-2010 se ha estimado un total de 5.836 Tg de monóxido de carbono, con la presencia de incendios forestales en zonas con alta frecuencia de incendios el limite anterior se sobre pasan cada vez que se quema la biomasa, por lo que las emisiones podrían estar afectando la salud de la población humana en México debido a la exposición de una mala calidad del aire. Se han reportado emisiones de CO en un rango de 88-128 Tg producidos por incendios en bosques boreales de Rusia y Norteamérica en 1998 (Kasiskhe *et al.*, 2003). El promedio anual al rango estimado en este trabajo fue de 108 Tg de monóxido de carbono. Haciendo una comparación de resultado de la estimación de CO, nuestra

estimación es 18 veces menor a la cantidad que reporta Kasiskhe *et al.*, (2003). Esto se debe a que en ese trabajo se estimó el área quemada a partir de imágenes de satélite, además de una considerar variable la eficiencia de quema, a diferencia que en este trabajo se consideró constante. En ambos estudios se aplica la ecuación de Seiler y Crutzen *et al.*, (1980), pero Kasishke *et al.*, (2003) aplico variabilidad de en los datos de eficiencia de quema los cuales obtuvo de estudios realizados en laboratorio. Los incendios forestales en bosque boreales son diferentes a los incendios en la vegetación de los trópicos. Nosotros mantuvimos constante el número de eficiencia de quema ya que es el valor más recomendable para vegetación localizada en los trópicos. El área quemada obtenida a partir de imágenes de satélite resultan una mejor aproximación que aquel obtenido de un promedio anual derivado de datos de puntos de calor, donde además podría faltar información del área real quemada debido a que la CONAFOR no documenta todos los incendios que documenta CONABIO a través del programa de monitoreo de puntos de calor. Mas nuestro resultado sigue estando dentro de los resultados obtenidos en otros estudios.

4.6 Estimación de emisiones de metano

El metano es un gas común en las emisiones de incendios forestales y aunque la cantidad total en masa emitido es menor que el CO₂, se debe recordar que tiene un efecto invernadero aproximadamente 20 veces más grande que el CO₂. Otra vez, se aplicó la ecuación de M (Xi) con un coeficiente de emisión de 0.32 para calcular las cantidades de Metano (CH₄) que se emiten en los incendios forestales. En la **Figura 4.7** se muestra la estimación y localización geográfica de la cantidad de metano (CH₄) producida durante la quema de biomasa. El valor acumulado para el periodo fue de 1.2 Tg. Se puede observar que las emisiones totales anuales en celdas de 20 km x 20 km variaron entre 1 y 5 Mg. Con grandes emisiones en la península de Yucatán y en las sierras principales de México. Se distinguen también áreas de Chiapas y en la región del norte de Veracruz y en la Huasteca Potosino. Las emisiones en estas últimas regiones probablemente se

deben a la influencia de quema de caña de azúcar en los cañaverales. Lo mismo ocurre en zonas de Jalisco y Nayarit.

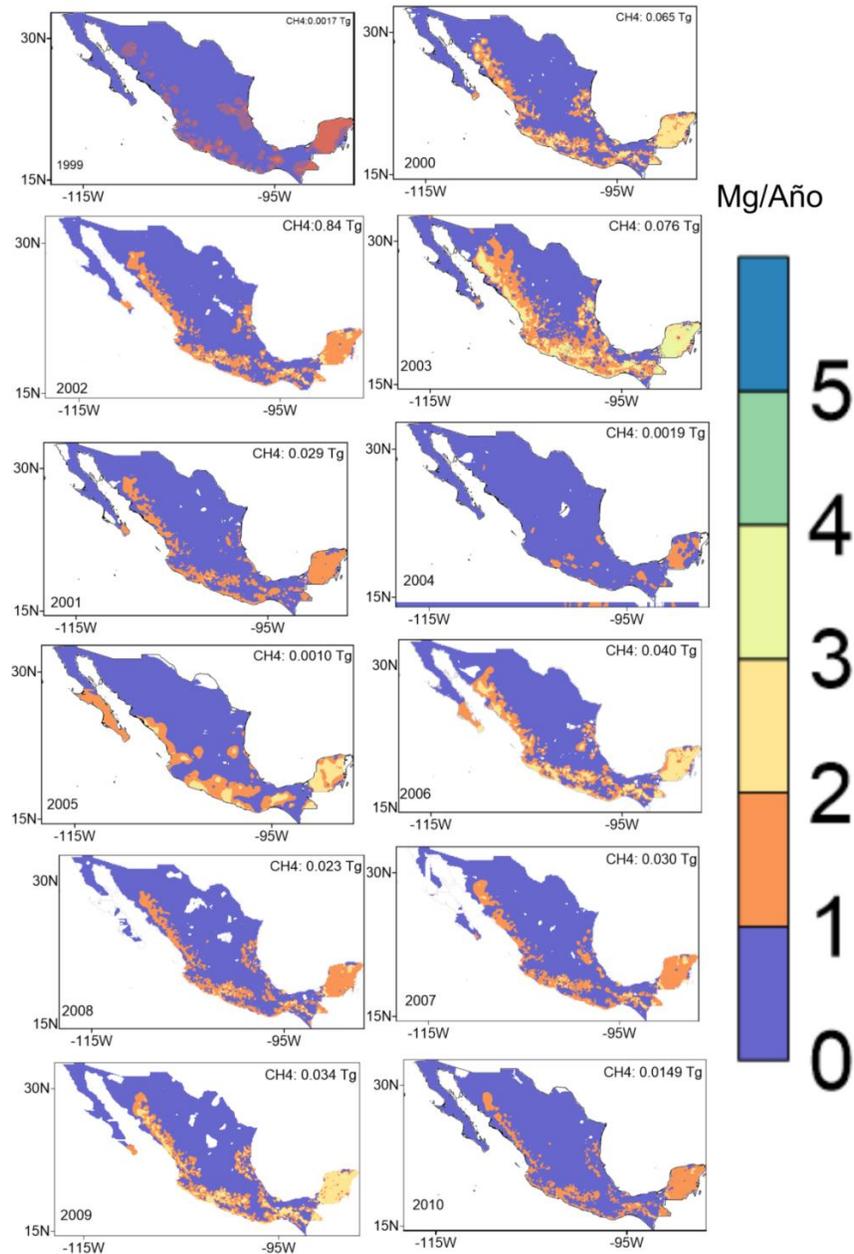


Figura 4.7. Distribución de las emisiones de Metano por incendios forestales en México.

Se sabe que el metano tiene un efecto invernadero en la atmósfera 23 veces más que el dióxido de carbono (CO₂). Por ejemplo, en una escala de tiempo a 100 años la presencia de un kilogramo de CH₄ en la atmósfera calienta 23 veces más

que un kilogramo de dióxido de carbono. En este estudio se calculó una emisión de aproximadamente 1.2 Tg de Metano ($\sim 12 \times 10^{10}$ kg) durante el periodo 1999-2010 debido a incendios forestales. La cantidad emitida ocasiona un calentamiento de 27,600 000 de CO_2 equivalente para los próximos cien años más lo que se acumule en los próximos años. Por lo que, la quema de biomasa y sus emisiones a la atmósfera contribuyen altamente con el efecto invernadero y calentamiento de la atmosfera a nivel local y regional, ocasionando alteraciones en el balance de energía no sólo los ecosistemas donde se origina el incendio sino también en los alrededores de las regiones que se queman. El número total emitido de metano podría no ser tan grande como el CO y CO_2 , pero su efecto permanecen por mucho tiempo en la atmósfera.

4.7 Emisiones totales de CO_2 , CO y CH_4

Con el fin de tener una idea sucinta de las emisiones totales anuales de los gases descritos arriba se presentan las series de tiempo de los totales anuales. En la **Figura 4.8** se aprecia las emisiones totales anuales de CO_2 , CO y CH_4 calculadas a partir de las ecuaciones presentadas en el capítulo 3 y con la metodología sugerida en esta tesis.

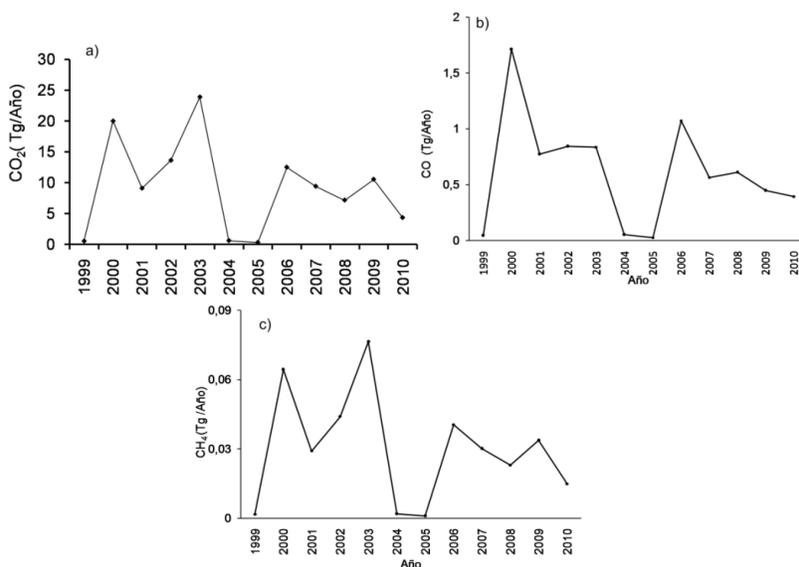


Figura 4.8. Emisiones totales anuales de a) CO_2 , b) CO, c) H_4 .

Las emisiones totales por año de dióxido de Carbono, monóxido de carbono y metano se muestran en la **Figura 4.8**. Las emisiones totales desde 1999 hasta el 2010 es 112 Tg de CO₂, 5.8 Tg de CO y 1.2 de CH₄ Tg. Estos valores resultan de la emisión estimada en cada punto de calor considerado en este trabajo como un incendio forestal. Las emisiones de CO son diez veces menor que el CO₂, esto se debe principalmente al factor de emisión que se utiliza para estimar esta sustancia emitida durante la quema de biomasa. El metano se emite en pequeñas cantidades y sus efectos se reflejan a largo plazo sobre el calentamiento global. Los resultados presentados en estos muestran que la información de puntos de calor que reporta la CONABIO, así como la información que reporta CONAFOR permitieron establecer una metodología para realizar estimaciones de la cantidad de contaminantes de CO₂, CO y CH₄ emitidos por los incendios forestales que han ocurrido en México desde 1999 a 2010.

En la **Tabla 4.1** se presenta el orden de magnitud comparada con otros estudios, lo muestra que similar a los gases mencionados anteriormente, la cantidad de metano estimado en este trabajo se encuentra también dentro del rango estimado que han obtenidos otros autores con metodología diferentes pero con la aplicación de la ecuación EQ(1).

Tabla 4.1. Comparación de emisiones estimadas por quema de biomasa (Tg)

CO ₂	CO	CH ₄	Referencia
828-1103	88-128	2.9-4.7	Kasischke <i>et al</i> , 2003 (Norte América y Rusia)
5716	271	12.52	Hoelzemann <i>et al</i> 2004 (Global)
191.485	32.794	1.845	Levine, <i>et al</i> 2000 (Kalimantan y Sumatra)
112	5.8	1.2	Esta tesis, 2015 (México)

Los datos de puntos de calor en la estimación de las emisiones, son analizados y filtrados en forma rigurosa por la CONABIO lo que da un factor de alta certeza en su aplicación. Muestra de este análisis, CONABIO realizó en el año 2008, un

estudio de validación de los puntos de calor en donde el 85% de los puntos si se corresponden con incendios reales (Ressl *et al.*, 2008). Esto es necesario mencionarlo ya que los datos de puntos de calor fueron datos esenciales para realizar las estimaciones que se han mostrado.

4.8 Índice de Riesgo de emisiones de CO₂ en México

Los cálculos presentados anteriormente revelan aspectos muy importantes sobre las emisiones de gases de efecto invernadero y cuyas altas concentraciones afectan grandes áreas del territorio mexicano. Este problema ambiental generado por los incendios forestales sugiere cuantificar de algún modo el riesgo que traen consigo los incendios forestales. Un aspecto indudablemente de fundamental importancia es los efectos de contaminación atmosférica que ocasionan los incendios forestales sobre todo en regiones donde ocurren en gran número. Por tanto, con la información generada en este trabajo se presenta a continuación un índice de riesgo por emisiones de CO₂.

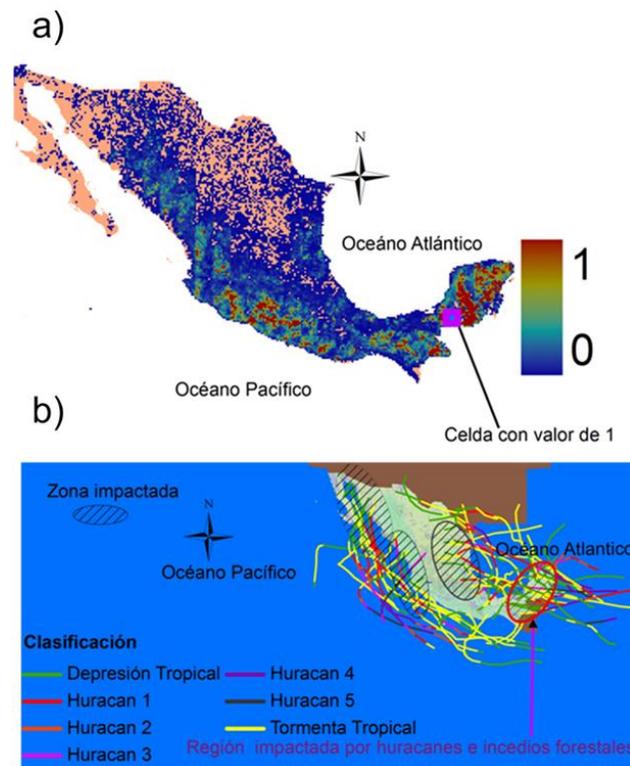


Figura 4.9.a) Índice de riesgo de emisiones de CO₂ producido por incendios forestales. **b)** Trayectoria de huracanes desde 1999-2010. Datos por CENAPRED.

La **Figura 4.9a** muestra un índice de emisiones de CO₂ con rango de 0 a 1 sobre la República de México. Donde 1 es el mayor riesgo y 0 indica el mínimo riesgo. La metodología empleada para el cálculo de este índice de riesgo fue la siguiente: se consideraron celdas con un área de 0.1° x 0.1° (~20km x 20km). Posteriormente se cuantificaron el número de incendios, el tipo de vegetación en cada celda, la biomasa por km² y el área promedio anual de incendios. Después se aplicó la metodología descrita en el capítulo 3 para el cálculo de emisiones de CO₂. De este modo se obtuvo la emisión total anual de cada celda del territorio nacional. El siguiente paso fue localizar la celda con el valor máximo de emisiones y posteriormente el valor de emisiones de cada celda fue dividido entre el valor máximo. De esta manera se obtuvo una distribución de valores de emisión normalizados entre 0 y 1. Esta estandarización permitió distinguir inmediatamente las zonas de México con un alto índice de riesgo por emisiones de CO₂. Es importante mencionar que este índice está basado en los incendios ocurridos en todo México en el periodo 1999-2010. Los valores máximos (cerca de 1) de emisiones se localizan en la región de la Sierra Madre del Sur, Sierra Madre Occidental y en la península de Yucatán. Las poblaciones de estas regiones están expuestas año con año a una situación ambiental que puede ser crítica si las plumas generadas por los incendios forestales que ocurren simultáneamente (y que pueden ser cientos a la vez) se dispersan sobre grandes zonas urbanas. Los factores que causan el gran número de incendios van desde prácticas ancestrales agrícolas hasta combustible generado por eventos hidrometeorológicos como huracanes que devastan áreas selváticas y boscosas. El efecto de los huracanes puede verse en la Figura 4.9b donde se muestra las trayectorias de algunos huracanes y las áreas potencialmente afectables.

La región con valor de mayor riesgo a incendios se localiza en el estado de Campeche cerca de la frontera con el estado de Yucatán. La Zona con valor máximo está cubierta por el tipo de vegetación de Selva y se encuentra con poca influencia de áreas urbanas. Los incendios que producen las emisiones

regularmente son devastadores debido a que ocurren en zonas de difícil acceso para de mitigar el fuego.

Otro factor que favorece la ocurrencia de incendios y por ende de emisiones de contaminantes en la zona de máxima emisión, se debe al paso de huracanes en esa zona. La alta carga de biomasa producida durante la trayectoria de un huracán queda susceptible a ser quemada en la época favorable a incendios. En la **Figura 4.9b**, se muestran las regiones de impacto de huracanes en México.

Con el índice de emisiones se puede formular medidas de control y mitigación de los incendios que ocurren en las zonas con valores altos de emisiones con la finalidad de prevenir a las poblaciones urbanas que pudieran verse afectadas con niveles elevados de contaminantes en la época en que ocurren los incendios forestales en México y las regiones de Campeche y Yucatán que son las más vulnerables.

4.9 Modelación Numérica de la dispersión de CO en la Región más crítica de emisiones de contaminantes

Hemos discutido sobre un índice de riesgo por emisiones de CO₂, es decir, sobre las mayores fuentes de CO₂ emitido a la atmósfera. A continuación se muestra cual es la zona de influencia de esas emisiones, que áreas afecta la dispersión del CO₂ una vez que fue emitido. Se decidió modelar la dispersión de aerosoles por incendios forestales en la celda con el mayor riesgo, es decir la celda con el valor 1 que está ubicada en la península de Yucatán. La modelación numérica se llevó a cabo con la aplicación del modelo WRF, se seleccionó una fecha en la cual ocurrían decenas de incendios en la celda considerada. La dispersión de la pluma generada por este grupo de incendios en la celda con riesgo 1 se muestra en la **Figura 4.10a**.

Se eligió el incendio forestal ocurrido el día 19 de marzo del 2003. La finalidad de la modelación es mostrar que las emisiones de contaminantes producido durante un incendios forestal impactan grandes regiones a través de la contaminación atmosférica. Estos impactos a la atmosfera producen una mala calidad del aire afectando la salud de personas. La imagen satelital mostrada en la **Figura 4.10a**

revela una enorme pluma de aerosol propagándose hacia el norte. Esta pluma fue generada por cientos de incendios ocurridos en México y Centroamérica. Claramente, la pluma está siendo dispersada y advectada hacia los Estados Unidos de América lo cual revela que la contaminación atmosférica por incendios forestales es un asunto internacional. La simulación numérica mostrada en la **Figura 4.10b** muestra los alcances de los incendios ocurridos únicamente en la celda mencionada arriba. Se observa que la pluma modelada por esa pequeña celda alcanza grandes extensiones de la península de Yucatán.

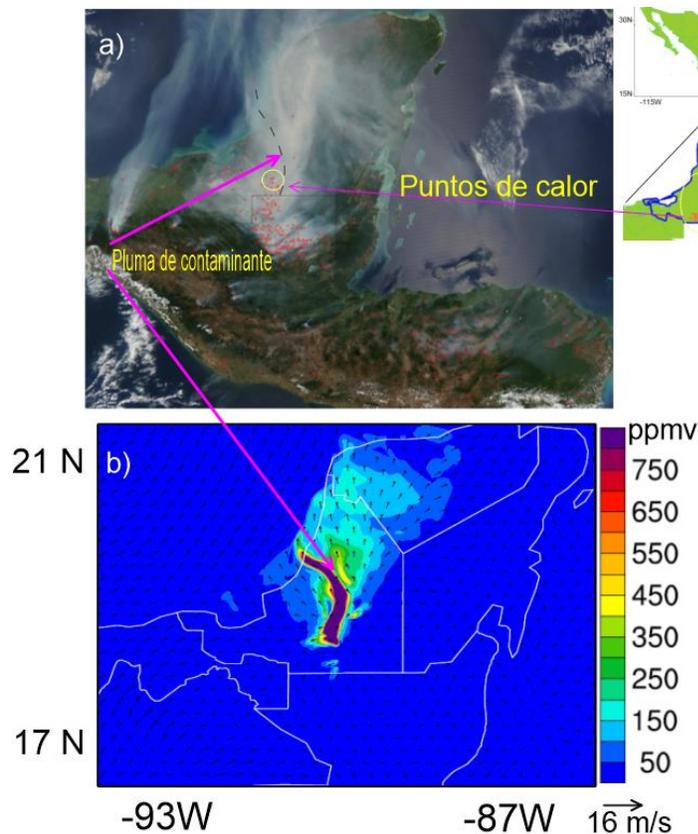


Figura 4.10. a). Imagen satelital y pluma de humo. b) modelación de la dispersión de CO en la región de máxima emisión.

Aunque la modelación numérica de la dispersión de un contaminante producido por incendios forestales resulta ser demasiado compleja, es necesario obtener resultados aproximados para conocer la región de influencia del incendio. El

modelo WRF-CHEM acoplado con otro modelo SFIRE ha sido usado para modelar la dispersión de incendios forestales que ocurrieron en Santa Ana-USA en el 2007 (Konchanski *et al*, 2012). Los resultados de ese estudio muestran muy buena aproximación tanto en modelación de la dispersión como de la concentración de los contaminantes que originaron durante la quema de biomasa. En este estudio fue aplicado el modelo WRF-CHEM, aunque considerando gran parte de las configuraciones incluidas en la fase química en el modelo WRF. Esto genera incertidumbre debido a que no se hizo un estudio en campo para indicar al modelo el tipo de combustible quemado. En este trabajo, la información del contaminante a modelar fue proporcionada en forma puntual y se usó el inventario de emisiones de Estados Unidos-2005 para inicializar la modelación. Para reproducir las condiciones meteorológicas, en ambos estudios, se usó datos de reanálisis de la NCEP.

Aun con la falta de información de combustible quemado, la modelación muestra un gran avance para estudiar los impactos atmosféricos por los contaminantes que se producen durante los incendios. Además, solo se muestra una modelación numérica para una fecha en particular, por lo que no se puede generalizar, los impactos que ocasionan las emisiones de CO debido a incendios. Pero si se pueden hacer más experimentos numéricos en un trabajo a futuro, de tal manera que se pueda realizar para diferentes fechas y épocas del año para poder emitir un análisis de los impactos que ocasionan los contaminantes que producen en esa zona en la época de mayo estiaje.

La modelación numérica permitió reproducir la trayectoria que sigue una pluma de contaminante generada por quema de biomasa. En la **Figura 4.10a** se muestran la trayectoria de la pluma de contaminante producida durante el incendio del día 19 de marzo de 2003 a las 7 de la noche hora local de México. En la **Figura 4.10b** se registró la dispersión de la pluma por una toma satelital.

La imagen satelital (**Figura 4.10a**) la masa de contaminante que se observa se debe a la aportación de humo de muchos incendios y en el resultado de la modelación se muestra solo el aporte y la trayectoria de un evento de incendio en la celda que resultó con máxima emisión en el índice de riesgo de emisiones de

CO₂. La **Figura 4.10b**, se observa que las condiciones de viento y de dispersión de la pluma representan en buena forma la imagen de una pluma captada por el satélite.

La región afectada por la pluma de humo forma cubre los municipios de Candelaria, Calakmul en Quintana Roo y el municipio Campeche del estado de Campeche. Estas regiones tienen cobertura vegetal de Selva (selva fragmentada). El humo se dispersó hacia el norte de Yucatán y Quintana Roo (ver **Figura 4.10**).

La modelación numérica como herramienta computacional, permitió ampliar la información acerca de la dispersión de contaminantes producidos por incendios forestales en la celda donde los incendios son más frecuentes. En este caso, la pluma de humo tiene la misma trayectoria que se observa en imágenes reales de acuerdo a la dirección de los vientos en la zona pero se puede obtener información importante del nivel de concentración de CO en las zonas cercanas (**Figura 4.10a**.y **Figura 4.10b**).

El resultado de la modelación de la dispersión de CO debido a incendios forestales es un hecho importante ya que regularmente no se reportan datos de concentración en las zonas afectadas por las plumas de humo, en este sentido la modelación numérica se convierte en una herramienta trascendente en la estimación de los impactos a la salud y calidad del aire debido a contaminación atmosférica que generan los incendios forestales.

La **Figura 4.11** presenta la altura que alcanzó la dispersión del contaminante de CO (250 metros). La pluma de contaminantes producidos por el incendio forestal que ocurrieron el día 19 de marzo de 2003 se dispersó de acuerdo a las condiciones meteorológicas que se presentaron durante el incendio.

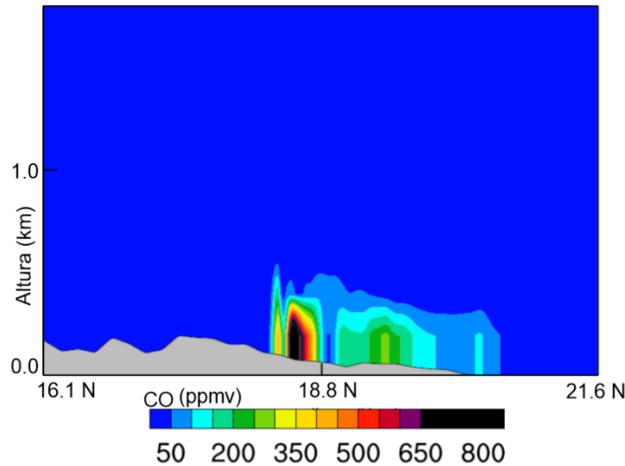


Figura 4.11. Altura de la pluma de humo en la zona de simulación.

La **Figura 4.11** presenta la altura que alcanzó la dispersión del contaminante de CO (250 metros). La pluma de contaminantes producidos por el incendio forestal que ocurrieron el día 19 de marzo de 2003 se dispersó hacia el norte bajo las condiciones meteorológicas que se presentaron durante el incendio. La altura alcanzada por la pluma de humo permite que los contaminantes se queden en la troposfera ocasionando mala calidad de aire, afectando las áreas urbanas y la salud de personas.

La **Figura 4.12** muestra la temperatura sobre la región modelada con un rango de 10 a 34 grados. La región geográfica presenta temperaturas cálidas, debido a la poca variación en su orografía (**Figura 4.11**) y además de estar influenciada por mar Caribe (ver **Figura 4.12**). Para un trabajo futuro se puede analizar la influencia de la temperatura en ecosistemas forestales de México para determinar en qué orden de magnitud favorece la presencia de incendios forestales en el país.

La velocidad del viento (**Figura 4.12**) es de 16 m/s, favoreciendo la dispersión de la pluma de humo en dirección al océano atlántico y norte de Yucatán y Quinta Roo. La modelación numérica resultó un gran aporte como herramienta ya que se complementa muy bien con los registros de imágenes satelitales que se tienen de incendios forestales para México y que pueden aplicarse para generar más

información a cercar de la problemática de la contaminación del aire por quema de biomasa.

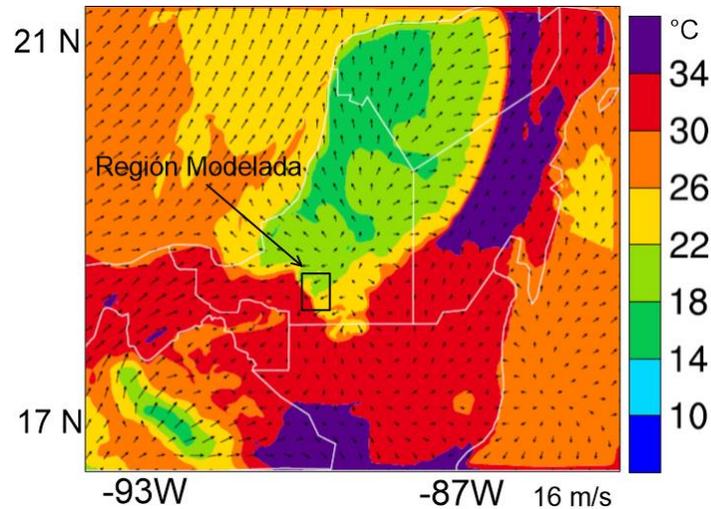


Figura 4.12. Presenta los valores de temperatura y dirección de los vientos en el dominio de simulación a la hora 19 del día 19 de marzo del año 2003.

4.10 Frecuencia de incendios forestales en México

Un número relativamente pequeño de incendios forestales en un bosque puede quemar grandes cantidades de biomasa y emitir a la atmósfera enormes cantidades de contaminantes. Por otro lado, un gran número de incendios en ecosistemas con relativamente poca biomasa también pueden emitir enormes cantidades de aerosoles a la atmósfera. Por tanto es indispensable investigar la distribución de frecuencia de incendios forestales. Del análisis realizado al conjunto de datos de incendios forestal (puntos de calor) y, a los datos digital del territorio Mexicano, se estimó la frecuencia de incendios forestales en una celda de tamaño $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ ($\sim 20\text{km} \times 20\text{km}$). En la **Figura 4.13** se observa grandes valores de frecuencia en la península de Yucatán, la Sierra Madre del Sur, Sierra de Chiapas y Sierra Madre Occidental. La frecuencia máxima de incendios por celda alcanzo valores de hasta 27 000 para el periodo 1999-2010 en la región sur de la península de Yucatán.

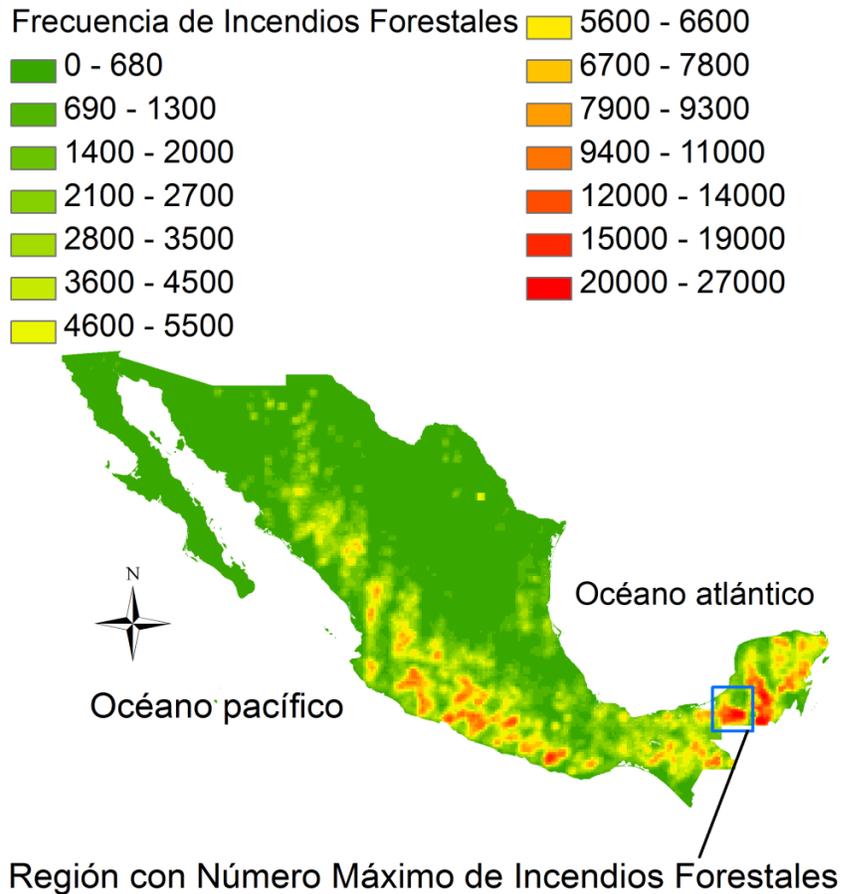


Figura 4.13. Frecuencias de incendios forestales en México 1999.2010.

La mayoría de los incendios forestales que ocurren en México tienen localización geográfica predominante hacia el Sur y Sur-este del País (**Figura 4.13**). La región con mayor número de incendios coincide con la zona donde el valor de las emisiones de CO₂ son máximas (por ejemplo en la **Figura 4.9a**). Este resultado es relevante dado que no existe información a nivel nacional sobre las regiones más afectadas por quema de biomasa. En estudios previos se menciona que estas mismas regiones son altamente impactadas por quema de biomasa de acuerdo a un estudio que realizó para estimar la cantidad de carbón liberado a la atmósfera por quema de biomasa en 1998 (Michael *et al.*, 2007). En ese año se sabía de acuerdo a imágenes de satélite analizadas que en esa región siempre se suceden

muchos incendios, pero no había datos o estudios que indicaran que eran las más afectadas en toda la República, con el resultado del mapa de frecuencias tenemos la evidencia de que son las regiones que más afectadas. La región tiene el tipo de vegetación de selva, por lo que su carga de biomasa es grande (ver **Tabla 3.1**). Urquiza-Haas *et al.*, (2007) hace mención a las regiones con más frecuencia de incendio tiene cobertura de vegetación de selva altamente fragmentada. Algunas actividades humanas como la práctica de quema para el uso de la tierra en la agricultura, ganadería y la presencia de huracanas favorece una mayor carga de combustible forestal susceptible a ser quemado. Los resultados de la frecuencia de incendios muestran información importante para enfocar políticas y formas de control para disminuir los incendios forestales en los sitios afectados. Como el control de las quemas para que no se afecte la calidad del aire debido a las emisiones que se producen durante la quema de combustible forestal.

4.11 Consumo de la vegetación existente

Una de las principales consecuencias de la incidencia de incendios forestales es el consumo de biomasa. Se mostrado que igualmente grandes extensiones de ecosistemas son devastados cada año. Es por tanto muy relevante investigar los consumos de biomasa totales debido a los incendios forestales y comparar estos ritmos de quema de biomasa para cada tipo de vegetación con la cantidad total de biomasa de cada vegetación existente.

Del análisis realizado a los datos de la cobertura vegetal, como la determinación de los polígonos de cada tipo de vegetación, la cantidad de biomasa por km², conociendo el número de incendios en cada tipo de vegetación y el área promedio afectada es posible determinar el consumo anual de biomasa para cada tipo de vegetación. En la **Figura 4.14a** se muestra la cantidad total de biomasa existe en cada tipo de vegetación, es decir, se calculó la biomasa contenida en el polígono de cada tipo de vegetación en todo México. Los datos de biomasa integrados sobre toda la superficie de cada tipo de biomasa están ordenados de mayor a menor valor, siendo selva la vegetación con mayor cantidad de biomasa en todo el territorio nacional y la clasificación otros pastizales la de menor cantidad de

biomasa. Es interesante mencionar que la forma exponencial de la curva permite representarla en principio a través de una ecuación diferencial muy simple

$$\frac{dB}{dV} = -\alpha B$$

Donde B sería la biomasa y V la vegetación. Este comportamiento logarítmico permite expresar por año y por tipo de vegetación el comportamiento de la biomasa quemada en cada año del periodo considerado de 1999 a 2010. Como la curva de la **Figura 4.14a**, tiene un decaimiento exponencial y haciendo la misma estimación para la biomasa total quemada por tipo de vegetación, entonces se puede obtener el logaritmo natural de la biomasa total y la biomasa quemada para cada tipo de vegetación.

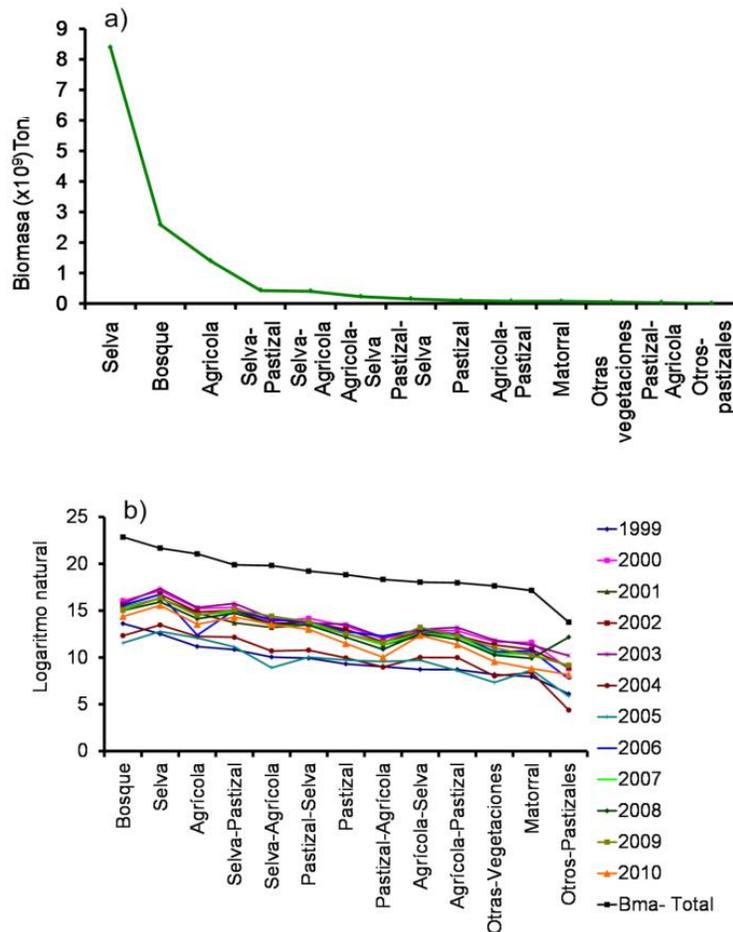


Figura 4.14. a) Cantidad de Biomasa por superficie en cada tipo de vegetación. b) Carga de biomasa en cada tipo de vegetación.

La **Figura 4.14b** muestra el logaritmo de la biomasa total en cada cobertura vegetal y la biomasa total quemada en cada año. El hecho de que las curvas sean una muy buena aproximación a una recta en la escala semi-logarítmica revela el comportamiento exponencial de las quemaduras de biomasa en cada año y para cada tipo de vegetación. La curva negra expresa la cantidad total existente de biomasa a nivel nacional para cada tipo de vegetación y las curvas de colores representan los valores para cada año y en el eje horizontal están los tipos de vegetación. Un análisis de estas curvas revela que en la escala de logaritmo natural la biomasa total existente para cada tipo de vegetación es aproximadamente 7 órdenes de magnitud más grande que los ritmos de consumo anuales de cada tipo de vegetación. Esto quiere decir que de forma burda y sin considerar regeneración natural o antropogénica la biomasa en el ecosistema selva se consumiría en alrededor de 1800 años. Cálculos semejantes pueden ser llevados a cabo para otros tipos de vegetación.

Este resultado muestra que los ritmos de quema se mantienen casi constantes en los doce años que comprende el periodo desde 1999 hasta el 2010.

Las estimaciones anteriores permitieron realizar el siguiente proceso para obtener los resultados que se muestran en la **Figura 4.15a**. La biomasa total existente en cada cobertura vegetal menos la biomasa promedio quemada en cada cobertura vegetal por año 1999-2010 (**Figura 4.15b**) muestra la biomasa total que queda en cada cobertura vegetal para el año 2010. El análisis anterior permitió obtener el consumo por año de vegetación en cada cobertura considerada en este trabajo (**Figura 4.15c**). El periodo de agotamiento de las vegetaciones por incendios forestales varía de 46 años para otros pastizales a 1826 años para matorral.

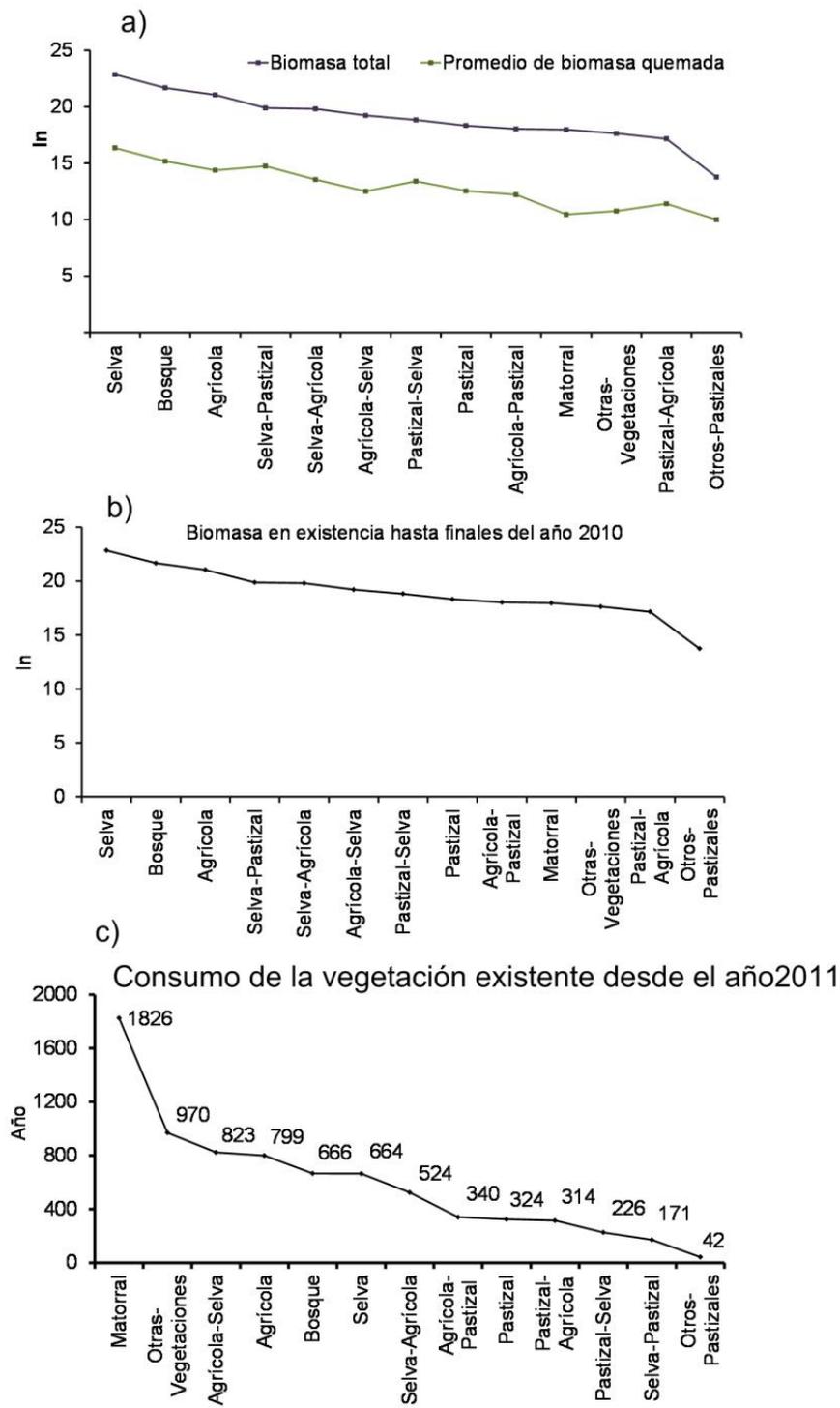


Figura 4.15 a) Biomasa total y biomasa quemada; b) biomasa en existencia y c) tiempo de consumo de la biomasa existente.

El análisis anterior permitió obtener el ritmo de consumo (biomasa quemada) por año en cada cobertura vegetal considerada en este trabajo. Esto revela en forma teórica que si en las coberturas vegetativas que se queman no se realizara reforestación, ni retoño de la vegetación quemada. Entonces al ritmo de consumo que se muestra, los incendios forestales producirían pérdida de ecosistema en México; por ejemplo, en primer lugar desaparecería la vegetación de otros pastizales y después selva-pastizal (mostrado en la **Figura 4.15c**). La extinción de las vegetaciones quemadas no siempre ocurre en su totalidad, ya que siempre se tiene cobertura vegetal de renuevo. Sin embargo, habría que analizar si la vegetación que es reforestada o el rebrote en una zona quemada tienen el tiempo suficiente para recuperarse de un incendio sin que se vea alterada la capacidad de resiliencia de los ecosistemas ante el disturbio del fuego. Esta sucesión de vegetación traería gradualmente en México grandes implicaciones climáticas y alteraciones en todos los ecosistemas de México. Por ejemplo, Gillett *et al.*, (2004) menciona que los incendios forestales incrementan la temperatura en las regiones cercanas a una zona quemada, las variables meteorológicas como la humedad y la velocidad de viento son alteradas por estos eventos. La relevancia de este resultado abre nuevas rutas para investigar los factores predominantes que favorecen la ignición en los ecosistemas de México, ya que en este trabajo solo se enfocó más a la parte de emisiones de CO₂, CO y CH₄ por incendios forestales.

Capítulo 5

Conclusiones

Se llevó a cabo un análisis exhaustivo sobre la problemática ambiental de devastación de ecosistemas y enormes emisiones de contaminantes a la atmósfera por incendios forestales. Las estadísticas realizadas revelaron que los incendios forestales ocurren prácticamente en toda la República Mexicana y afectando a todos los ecosistemas. Los resultados muestran que las vegetaciones más afectadas son selvas, bosques, pastizales y regiones de uso agrícola. La Metodología desarrollada en este trabajo para conocer las emisiones de dióxido de carbono, monóxido de carbono y metano puede ser aplicada a cualquier área de México y obtener una buena aproximación de las emisiones de aerosoles por incendios forestales. En este trabajo se obtuvo una primera aproximación sobre las emisiones totales anuales de CO₂, CO y CH₄.

El periodo comprendido en esta investigación abarcó 12 años, de 1999 a 2010. En este trabajo se demuestra que los incendios forestales en México han devastados extensas zonas del territorio vegetal, encontrándose que de acuerdo a los datos de áreas quemadas estimadas en este trabajo esto constituye un problema ambiental muy serio.

Las emisiones de dióxido de carbono producido por los incendios forestales que ocurren en México, están dentro del rango de valores que se han reportado en otros estudios realizados con metodologías diferentes a este trabajo y en regiones diferentes del planeta.

Las emisiones de Monóxido de carbono (CO) y de Metano (CH₄) se producen en un orden de magnitud menor que el dióxido de carbono (CO₂). Mas sus efectos en la atmosfera son más dañinos en el caso del metano que tiene un efecto invernadero 23 veces más grande que el CO₂. Por otro lado, debido a las grandes cantidades emitidas a la atmósfera, el CO tiene efectos que son perjudiciales para

la salud humana.

De acuerdo con este cálculo, durante el periodo de 12 años desde 1999 hasta el 2010, México ha emitido a la atmosfera la cantidad aproximada de 112 Tg, 5.8 Tg de CO y 1.2 Tg de CH₄. Con este trabajo se tiene una idea cuantitativa de estos contaminantes.

Se estimó la influencia de la dispersión del Monóxido de carbono (CO) causada en la región por la celda de máxima emisión para el día 19 de marzo de 2003 (fecha de los incendios modelados en este trabajo). La pluma modelada se dispersó hacia el norte sobre la península de Yucatán afectando grandes áreas. Se dispersó de acuerdo a las condiciones meteorológicas existentes. Los resultados concordaron muy bien con las plumas detectadas en imágenes satelitales. Estos resultados muestran que la modelación numérica es una herramienta computacional que permite visualizar la dispersión y trayectoria de la pluma de contaminantes producida durante la quema de biomasa. La altura máxima de la pluma del contaminante CO, modelada en este trabajo, fue de alrededor de los 250 metros, lo cual indica que se propaga en la parte baja de la atmósfera teniendo un efecto más negativo sobre la población. Los cientos de incendios forestales que ocurren año con año en esta región afectan a nivel regional la calidad del aire tal y como muchas imágenes de satélite lo muestran.

En este trabajo se han mostrado diferentes aspectos relacionados con las afectaciones de los incendios forestales sobre los ecosistemas de México. Un factor muy importante es que se ha demostrado que a los ritmos actuales de consumo de vegetación por incendios forestales ciertos tipos de vegetación podrían consumirse totalmente. Esto por supuesto, sin considerar la recuperación natural y programas de reforestación. Sin embargo, los resultados son alarmantes. Indudablemente, estos cambios en la vegetación causados por los incendios forestales alteran el sistema climático en el país y contribuyen al cambio climático del planeta.

Referencias

Cochrane Mark A. C., (2001). Synergistic Interactions between Habitat Fragmentation and Fire in Evergreen Tropical Forest. *Conservation Biology*. Volume 15, No. 6. , Pages 1515-1521.

EPA, (2010). Methane and Nitrous Oxide Emissions from Natural Sources. *Report of April 2010*.

EPA, (2015). Overview of greenhouse Gases. *consultado en: <http://www.epa.gov/climatechange/ghgemissions/gases/co2.html>*.

PENUMA (Programa de las Naciones Unidas para el medio Ambiente (2002). Se extienden como un reguero de pólvora. *Editado por: Mark A. Cochrane PhD. ISBN: 92 - 807 - 1818 – 7*.

ARW, (2014). Version 3.6 Modeling System User's Guide July 2014. *Consultado en: http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3*.

Barbosa P., Camia A., Kucera J., Libertá G., Palumbo I., San-Miguel.-Ayanz., Schmuck G., (2009). Assesment of forest fires impacts and emissions in the European Union based on the European Forest Fire Information System. *Developments in Environmental Science, Volume 8, A. Bitnerowicz, M. Arbaugh, A. Riebau and C. Andersen (Editors). Elsevier B.V.*

Bautista-Vicente F., (2009). Modelación de la Dispersión de Aerosoles Producidos por Incendios Forestales en el Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera, Jalisco México. *Tesis de Maestría, 2009*.

Bessie W.C., and Johson E.A., (1995). The Relative Importance of fuel and Weather on fire Behavior in Subalpine Forests. *Econlogy, 76(3)*. *By the Ecological Society of American.*, pp. 747-762.

CCA, (2014). La quema de residuos agrícolas: fuente de dioxinas. *Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, Canadá.* , pp 6.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2013). Cambio climático. *Afirmaciones principales del resumen para responsabilidades políticas.*, pp1-2.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001). Third Assessment Report Climate Change 2001. *The Scientific Basis*.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2009). Un Summit on Climate

Change. 22 September, 2009. STATEMENT OF DR.K..PACHAURI. Chairman, IPCC.

Cochrane Mark A., (2003). Fires science for rainforest. *Nature*, Vol.421,. www.nature.com/nature.

COMET S-290,(2009). Efecto de la topografía en el comportamiento de los incendios forestales. . Consultar en: https://www.meted.ucar.edu/fire/s290/unit2_es/.

CONAFOR, (2013). Incendios en México. Consultado en: <http://www.conafor.gob.mx/portal/index.php/temas-forestales/incendios>.

CONAFOR-GPPC, (2010). Incendios Forestales (Guía práctica para comunicadores). *Reporte 249*.

CONAGUA, (2014). Clima en México. Consultado en: http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=103&Itemid=80.

CONAPO,(2014). Proyecciones de la Población 2010-2050. http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/De_las_Entidades_Federativas_2010-2050 .

Contreras-Moctezuma Javier, Rodriguez.-Trejo Dante A., Retama-Hernández Armando y Sánchez Rodríguez José J.M., (2003). Smoke Gases of Wildfires in Pinnus hartwegii forests. *Agrociencia* 37:309316.

Damoah R., Spichtinger N., Foreter C., James p., Mattis, Wandinger U., Beirle S., Wagner T., and Stohl A. (2004). Around the world in 17 days-hemispheric-scale transport of forest fire smoke from Russia in May 2003. *Atmospheric Chemistry and Physics*. , 1311-1321.

Victoria Sosa and Patricia Dávila, (1994). A floristic knowledge assessment Mexico. *Annals of the Missouri Botanical Garden*. Vol. 181, No 4 (1994). Published by: Missouri Botanical Garden Press. Stable URL:<http://www.Jstor.org/stable12399919>. Accessed:22/01/ , .pp.749-757.

FAO (United Nations Organization for Food and Agriculture) et al., (2001). Global Forest Fires Assessment 1990-2000.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) et al., (2006). Global Forest Resources Assessment 2010.

FAO et al., (2002). Unasylva. *Revista internacional de silvicultura e industrias forestales*. Vol.53, 2002/2, ISSN 0251-1584..

FAO (United Nations Organization for Food and Agriculture) *et al.*, (2010). Global Forest Resources Assessment 2010.

Gail, (2007). An interagency research, development, and applications partnership. . *Fire Science Dige St. Issue 1. October.*

Gilletl N. P. and Wearver A.J. Zwier F.W., F. M. (2004). Detecting the effect of climate change on Canadian forest fires. *Geophysical resarch letters, Vol.31.*

Grell, G. A. (2005.). Fully coupled online chemistry within the WRF model. *Atmos. Environ., Vol.39. , 6957-6975.*

Dale F. Hurst, David W., T. Griffith., John N., Carras David and J. Williams. (1994). Division of Coal and EnergyTechnology. *Geophysical Research .*

Hoelzemann, J.J., M. G.Schultz, G. P.,Brasseur, and Claire Granier., (2004). Evaluatingthe use of global area burnt satellite data. *Journal Geophysical Research, Vol. 109.*

Bravo Álvarez Humberto, Rodolfo Sosa Echeverría, Pablo Sánchez Álvarez, Mónica Jaime Palomera., (2006). Incendios Forestales en México. *Cap 6 P(75-90) ISBN:970-32-1843-1 .*

INEGI,(2014). Censo de Población y Vivienda, 2010. *Consultado en: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/temas/default.aspx?s=est&c=17484>.*

INEGI, (2013). Geología de México. *<http://ww.inegi.org.mx/inegi/spc/doc/INTERNET/24%20Geolog%C3%ADa%20de%20la%20Rep%C3%ABlica%20Mexicana.pdf>.*

INEGI, (2009). Guia para la interpretación de uso de suelo y vegetación. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México). Escala 1:250 000. ISBN: 978-607-494-015-2. Cartografía-Estudio y enseñanza.*

INEGI,(2013). Manual de Geografía y extensión Territorial de México. *http://www.inegi.org.mx/inegi/spc/doc/internet/1GeografiaDeMexico/man_refgeog_extterr_vs_enero_30_2088.pdf.*

Levine J., (2003). Biomass Burnig: The Cycling of Gases and Particulates from the Biosphere to the Atmosphere. *NASA Langley Research Center, Hampton, VA, USA.*

Mac. Phaden Michael J., (2002). El Niño and La Niña: Causes and Global Consequences. . *The Earth System: physical and chemical dimensions of global environmental change. Edted by Dr.Michael Maccrycken and Dr. John Sperry.ISBN:0471-97-796-9.*

Villers-Ruiz-Lourdes y López-Blanco Jorge, (2004). Forest fires in Mexico. Method and evaluation. *Center for Atmospheric Sciences, National Autonomous University of Mexico. ISBN 970-32-1843-1.*, 164P.

Kasischke Eric S., L.ori P., (2003). Emissions of carbon dioxide, carbonmonoxide, and methane from boreal forest fires in 1998. *Journal Geophysical Research, Vol 108.*

Konchanski, A. K. (2012). Air Pollution forecasting by couple atmosphere fore model WRF and SFIRE with WRF-CHEM. *Wiki/coupling_with_wrf_wrf_chem.*

Lazaridis M., Latos M., and Aleksandropoulou V., Hov. A., Papayannis, and. Torseth K., (2008). Contribution of forest fire emissions to atmospheric pollution in Greece *Air Qual Atmos Health . 1:143–158. DOI: 10.1007/s11869-008-0020-0.*

Levine J., (1999). *Wildland Fires and the Environment a Global Synthesis. Atmospheric Sciences Division, NASA. Langley Research Center Hampton, USA, 1999.*

Lobert Yürgen M., Dieter H. Scharffe,Wei-Min Haob Thomas A. Kulhbusch,, Ralph Seuwen, Peter War neck and Paul J. Crutzen., (1991). Experimental Evaluation of biomass Burning Emissions: Nitrogen and carbon Containing Compounds. *Geophysical Research.*

Lugo-Hubp., J. (1990.). El relieve de la República Mexicana. *Universidad Nacional Autónoma de México, Inst. Geología, Revista, vol.9, núm. 1. , p. 82-11.*

Villers- Ruíz M., (2006). Los incendios forestales. *Revista de Ciencias. Vol.81.*

Morfín-Ríos, J.E., E.J. Jardel P., E. Alvarado C. y J.M. Michel-Fuentes., (2012). Caracterización y cuantificación de combustibles forestales. *Comisión Nacional Forestal-Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco, México.*

Wiedinmyer Chistine and Jason Neff., (2007). Estimates of CO₂ from fires in the United States: implications for car bon management. *Carbon Balance and Management 2007, 2:10 doi: 10.1186/1750-0680-2-10. Availablefrom: http://.cbmjournal.com/conten/2/1/10.*

NCARG (2010). Advancing the Science of Climate Change . *The National Academies Press, Washington, DC, USA.*

Nicholas E. Clinton, Peng Gong, Klaus Scottc., (2006). Quantification of pollutants emitted from very large wildlan fires in Southern California, USA. . *Atmospheric Environment. www.elsevier.com/locate/atmosen. , 40(3686–3695).*

Raich J. W. and Schlesinger, W. H., (1992). The global carbon dioxide flux in soil

respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus B*, 44: 81–99. doi: 10.1034/j.1600-0889.1992.t01-1-00001.

Ressl R., G. I. (2008). Operational active fire mapping and area identification applicable to Mexican Nature Protection Areas using MODIS and NOAA-AVHRR direct reanalysis data. *Remote sensing of Environment*. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/rse.

Richard W. Boubel, D. L. (1994). Fundamentals of Air. *Fundamentals of Air Pollution*. Third Edition. ISBN: 0-12-118930-9.

Wong González Julio Cesar y María Lourdes Villers Ruiz (2007). Evaluación de combustible y su disponibilidad en incendios forestales: un estudio en el Parque Nacional La Malinche. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. ISSN 0188-4.

Rzedowski J., (2006). Vegetación de México. . 1° edición digital, *Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad, México*. , 504 PP.

Levine J., (2000). Global Biomass Burning: A case Study of the Gaseous and Particulate Emissions Released to the Atmosphere During the 1997 Fires in Kalimantan and Sumatra, Indonesia. *Fires in Biomass Burning and its inter-relationships with the climate system advance in global change*.

OMS (Organización Mundial de la Salud), (2015). Incendios Forestales. Consultado en el 2015, en: http://www.who.int/hac/techguidance/ems/vegetation_fires/es/.

Seiler W., A. Crutzen, (1980). Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning. *Climate Change* .0165-0009/80/0023-0207, pp(207-247).

Skinner Carl y Chang Chi-Ru., (1996). Assessments and scientific basis for fire management options. *Assessments and scientific basis for management options. Assessment Centers for Water and Wildland Resources. Final report to Congress., Vol II*.

Solomon, S. D. (2007b). Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *UK, and New York, NY: Cambridge University Press*.

Sorukhán J., (2009). Natural Capital Mexico. Synthesis: Current knowledge, evaluation and sustainability perspective. *National Commission for the Knowledge and Use of Biodiversity of Mexico: ISBN: 978-607-7607-09-0*.

Urquiza-Haas Tania, P. M., (2007). Regional scale variation in forest structure and biomass in the Yucatan Peninsula, México: Effects of forest disturbance. *Forest Ecology and Management*. Available online at www.sciencedirect.com.

The Nature Conservancy, (2007). Iniciativa Global para el Manejo del Fuego. 13093 Henry Beadel Drive Tallahassee, FL 32312 U.S.A. (850) 668-0827 fire@tnc.org.

Tzitziki Janik García-Mora, J.-F., (2011). Aplicaciones del Sensor Modis para el Monitoreo del Territorio. *Cap 1,2*), ISBN: 978-607-7908-55-5. , P(13-69).

Yosio E, S. J. (2011). Aplicaciones del Sensor Modis para el Monitoreo del Territorio. *Cap 5*,), ISBN: 978-607-7908-55-5. , P(123-165).

ANEXO I

Incendios forestales en cada tipo de vegetación para el año 1999



Incendios forestales en cada tipo de vegetación para el año 2000



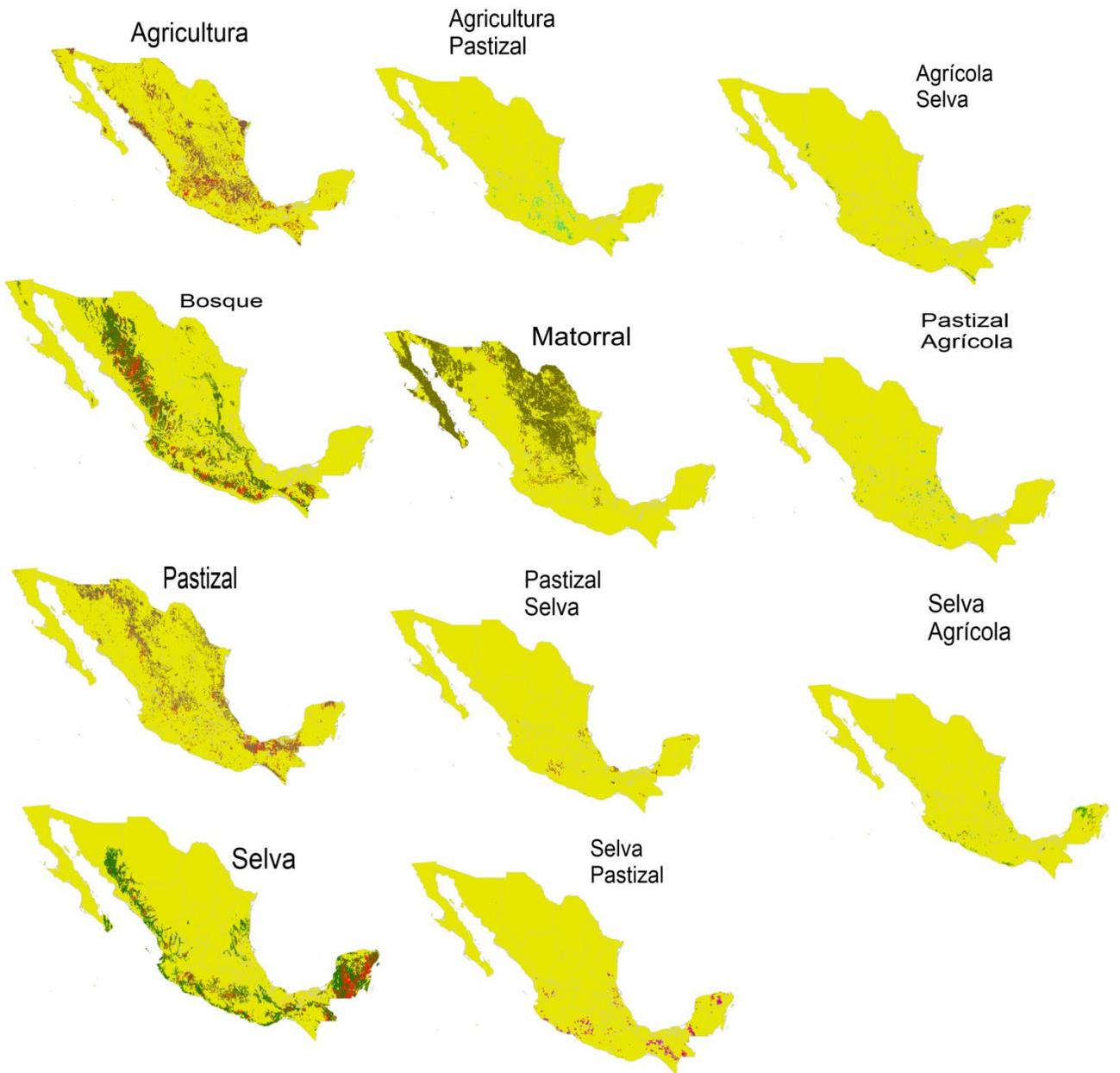
Incendios forestales en cada tipo de vegetación para el año 2001



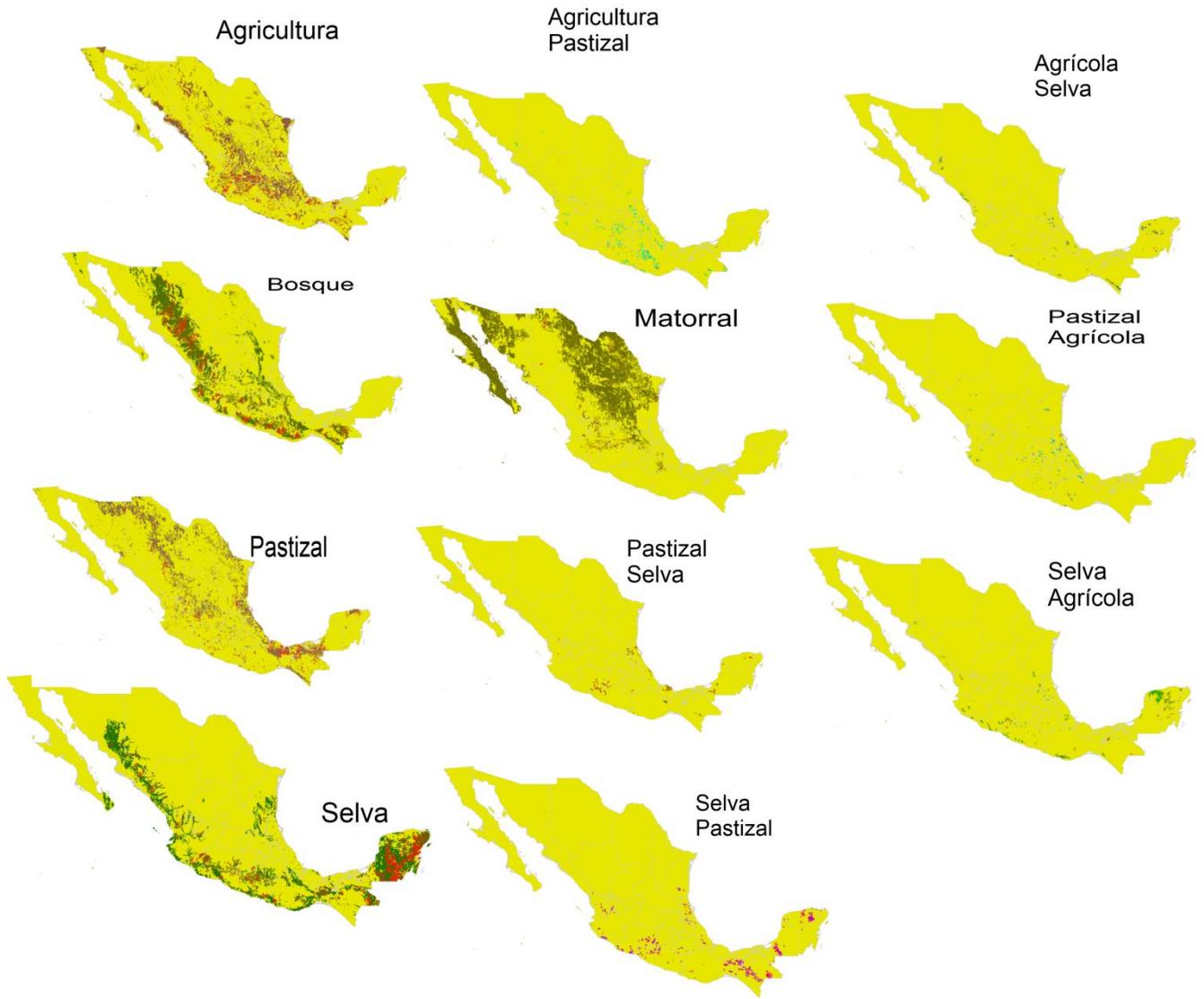
Incendios forestales en cada tipo de vegetación para el año 2002



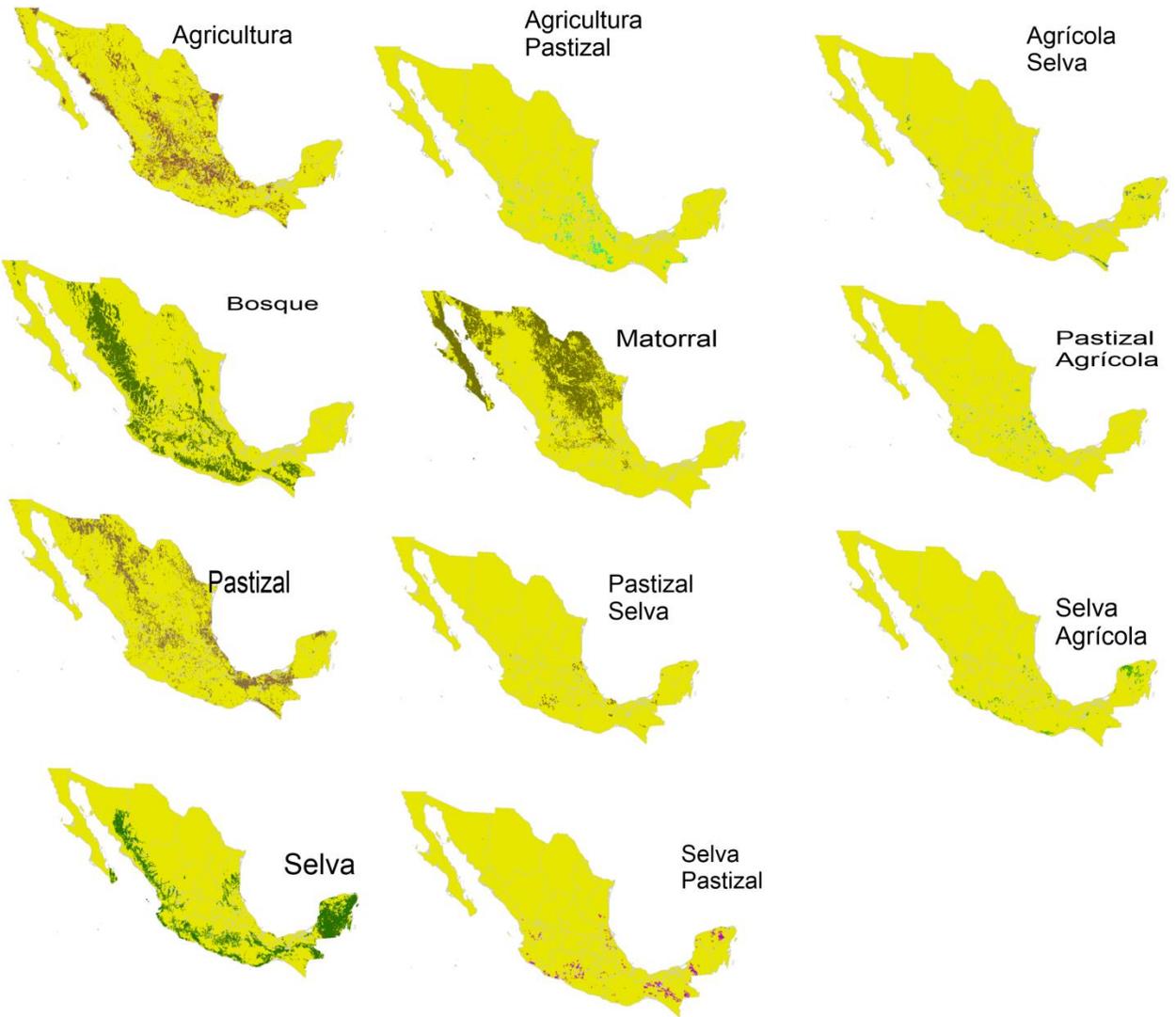
Incendios forestales en cada tipo de vegetación para el año 2003



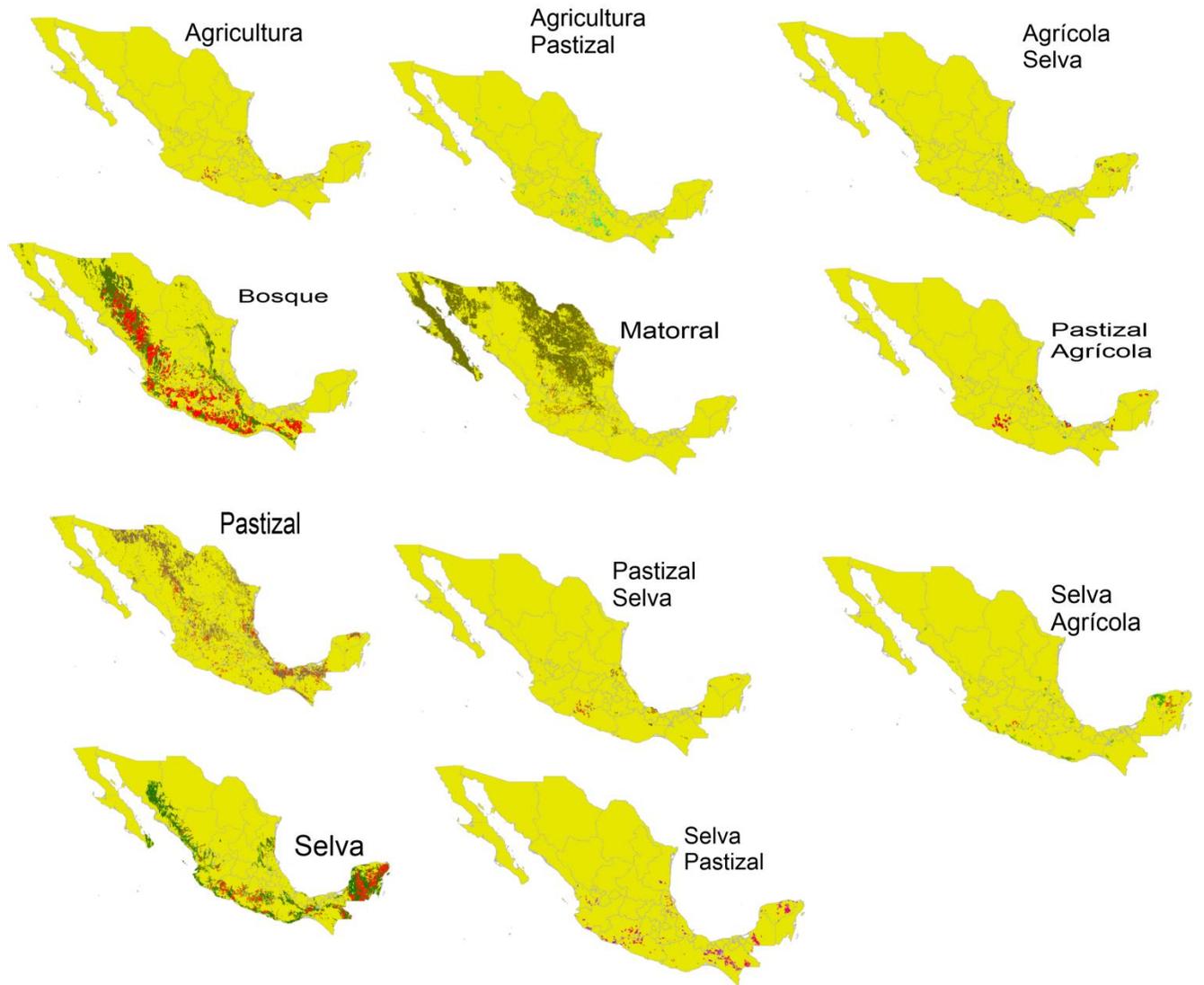
Incendios forestales en cada tipo de vegetación para el año 2004



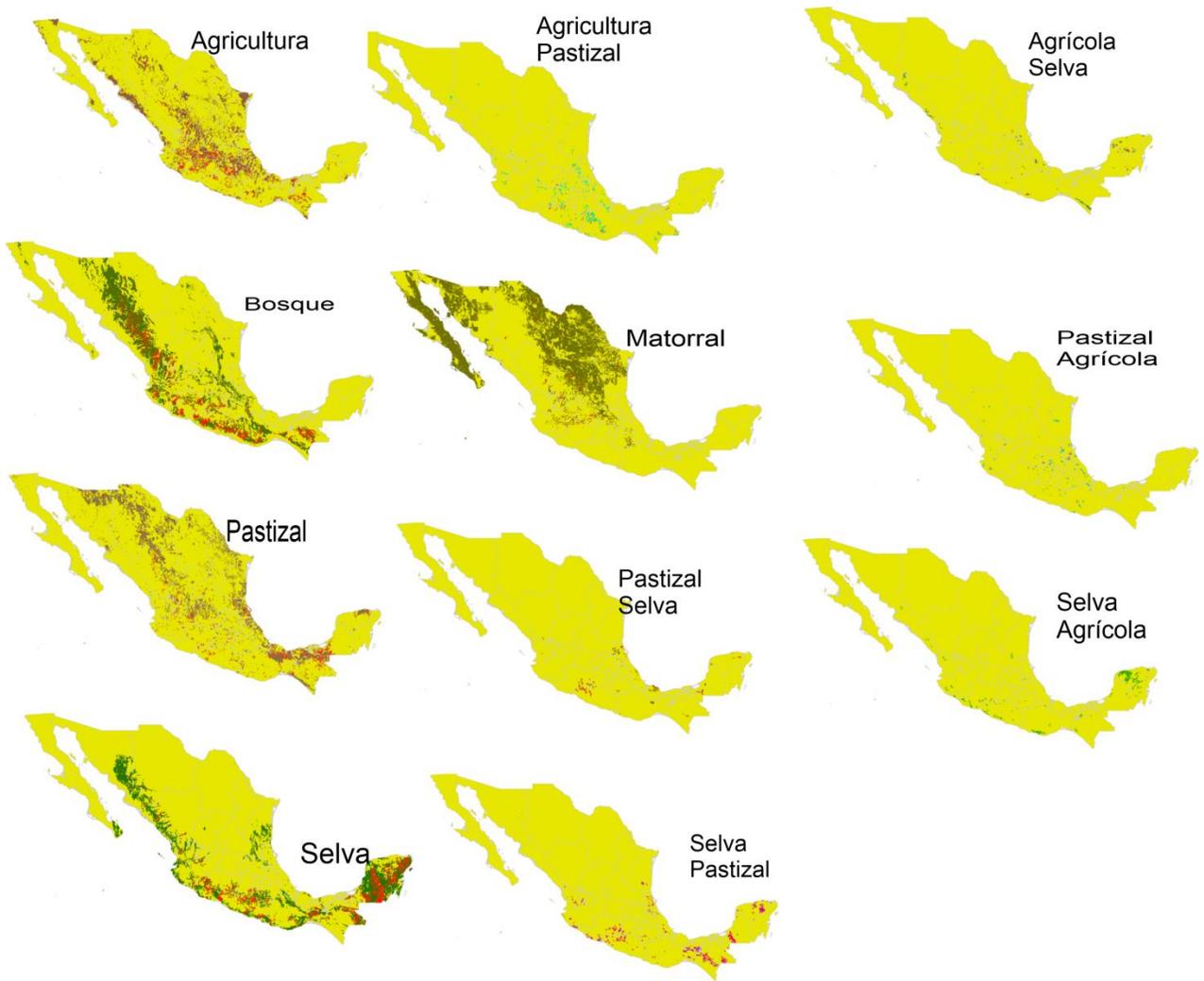
Incendios forestales en cada tipo de vegetación para el año 2005



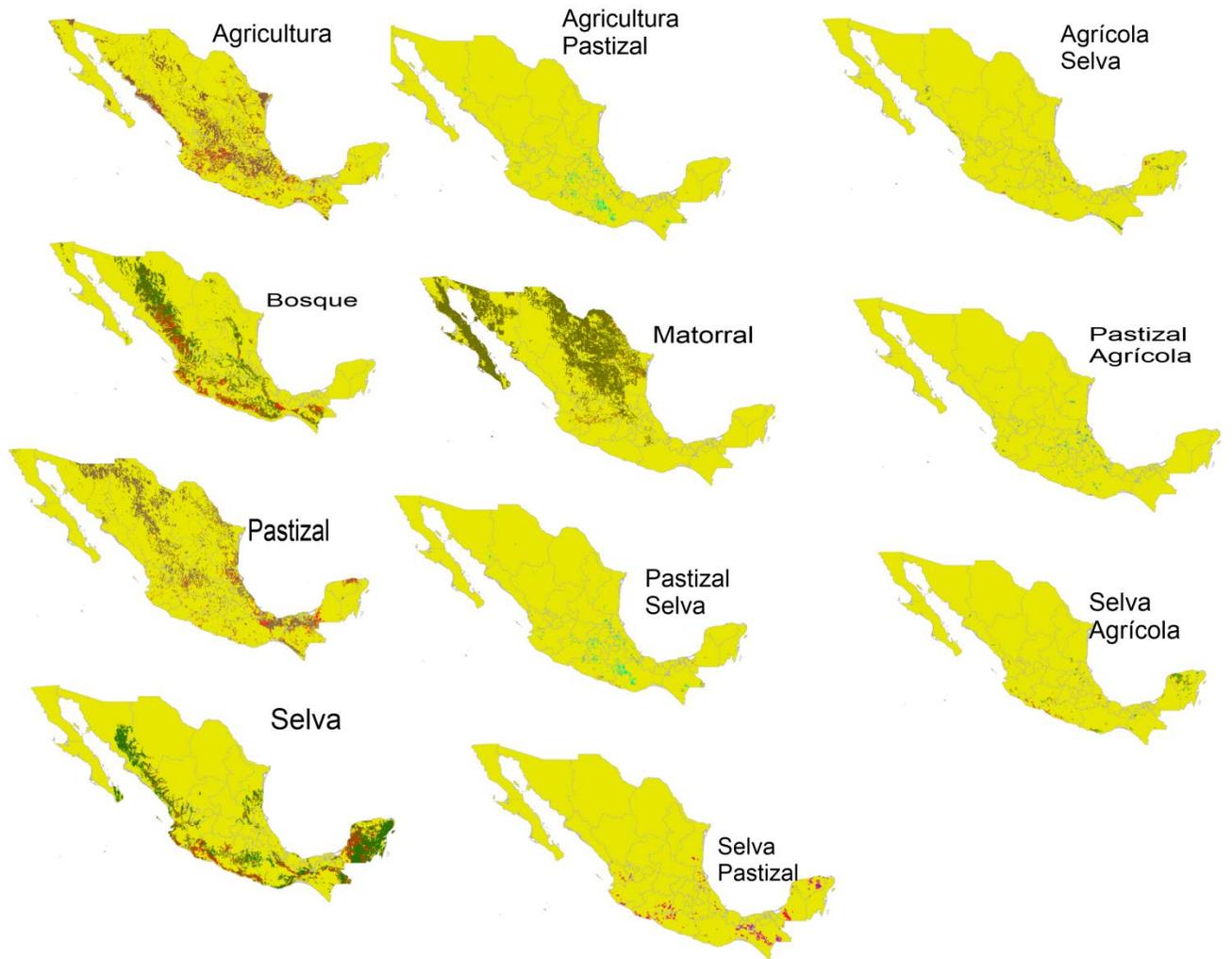
Incendios forestales en cada tipo de vegetación para el año 2006



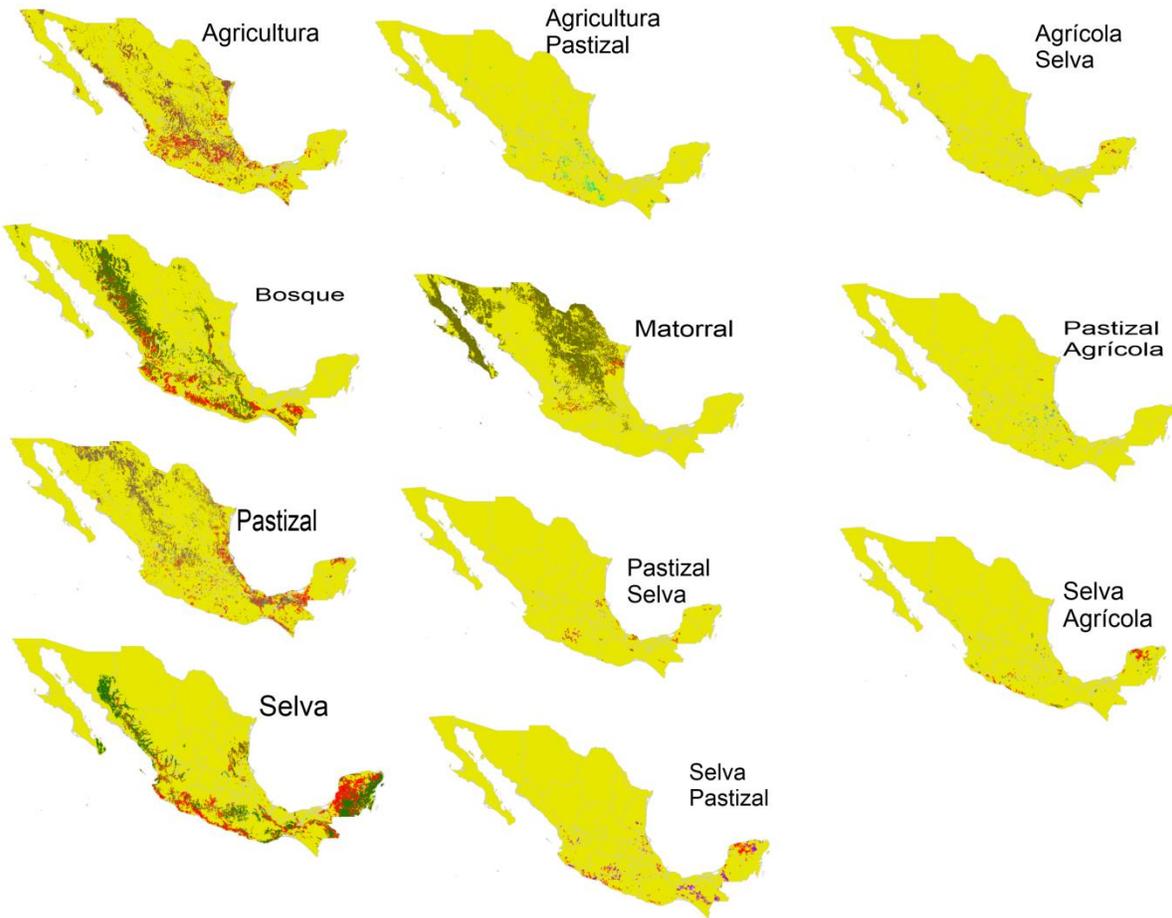
Incendios forestales en cada tipo de vegetación para el año 2007



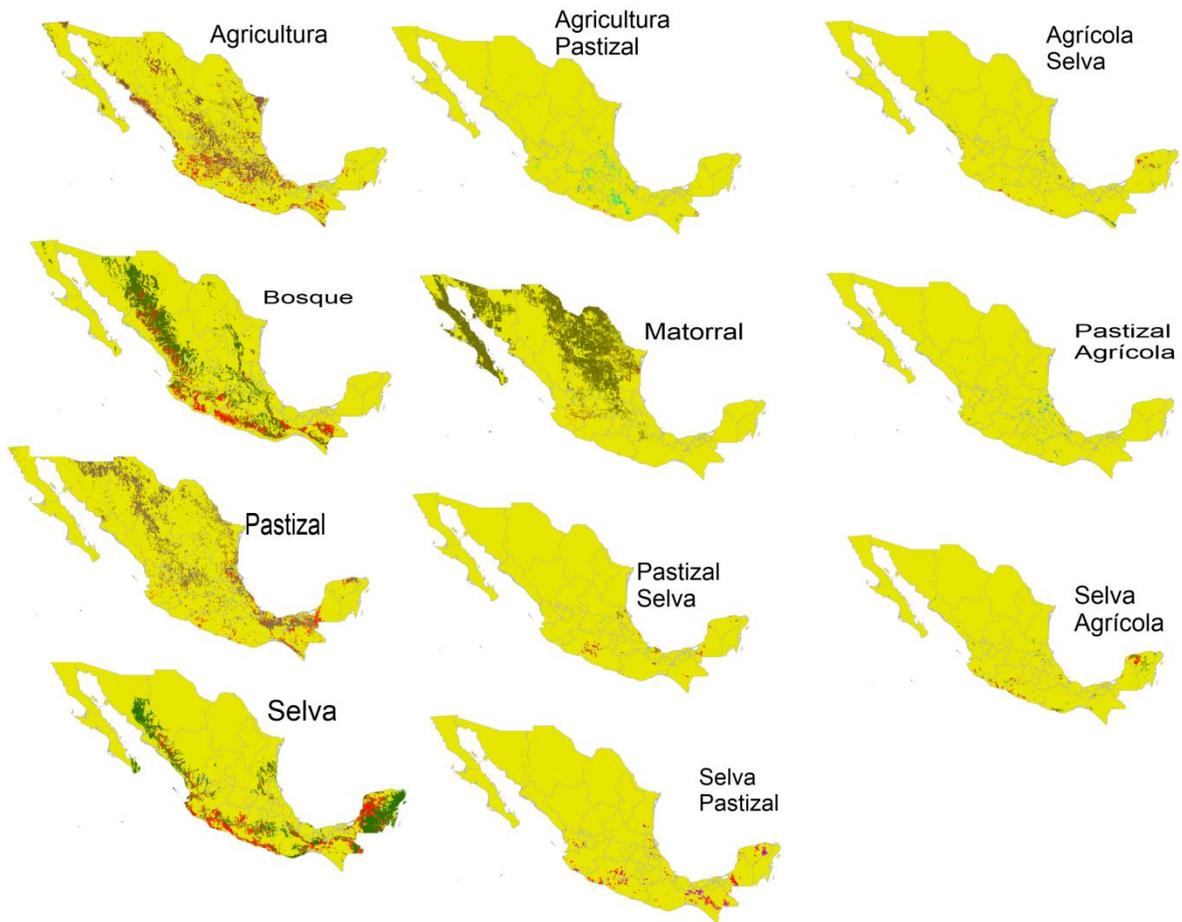
Incendios forestales en cada tipo de vegetación para el año 2008



Incendios forestales en cada tipo de vegetación para el año 2009



Incendios forestales en cada tipo de vegetación para el año 2010



ANEXO II

Artículo Publicado: Bautista Vicente, F., Carbajal, N., & Pineda Martínez, L. F. (2014). Estimation of Total Yearly CO₂ Emissions by Wildfires in Mexico during the Period 1999–2010. *Advances in Meteorology*, Vol 2014.

Research Article

Estimation of Total Yearly CO₂ Emissions by Wildfires in Mexico during the Period 1999–2010

Flor Bautista Vicente,¹ Noel Carbajal,¹ and Luis Felipe Pineda Martínez²

¹ *División de Geociencias Aplicadas, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, 78216, SLP, Mexico*

² *Unidad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Zacatecas, 98600, ZAC, Mexico*

Correspondence should be addressed to Noel Carbajal; noelc@ipicyt.edu.mx

Received 1 October 2013; Revised 15 January 2014; Accepted 23 January 2014; Published 16 March 2014

Academic Editor: Sachin D. Ghude

Copyright © 2014 Flor Bautista Vicente et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The phenomenon of wildfires became a global environmental problem which demands estimations of their CO₂ emissions. Wildfires have deteriorated the air quality increasingly. Using available information on documented wildfires and a data set of satellite detected hot spots, total yearly emissions of CO₂ in Mexico were estimated for the period 1999–2010. A map of the main vegetation groups was used to calculate total areas for every vegetation type. The yearly number of hot spots per vegetation type was calculated. Estimates of emitted CO₂ in a wildfire were then accomplished by considering parameters such as: forest fuel load, vegetation type, burning efficiency, and mean burned area. The number of wildfires and total affected areas showed an annual variability. The yearly mean of affected area by a single wildfire varied between 0.2 and 0.3 km². The total affected area during the period 1999 to 2010 was 86800 km² which corresponds to 4.3% of the Mexican territory. Total CO₂ emissions were approximately 112 Tg. The most affected vegetation types were forest and rainforest.

1. Introduction

The enormous growth of the yearly number of forest fires of natural and anthropogenic origin has become a global environmental problem that affects worldwide ecosystems. Maps indicating the position of wildfire's occurrence practically cover a high percentage of the area of affected countries. Since there is a large variability in the characteristics of ecosystems, determined basically by topography, latitude, humidity, atmospheric and oceanic flows, soils, and so forth, the quantification of biomass per unit of area in each type of vegetation became a fundamental issue to estimate the aerosols emissions by wildfires. Biomass burning causes damages to vegetation, injuries to animal species, and land cover changes. The aerosols, produced by forest fires, influence the air quality and they alter the natural geochemical cycles in the atmosphere. Biomass burning significantly affects the ecosystems at functional level [1–3]. Practically in the whole American continent, from Alaska, Canada, until Argentina, occur a large number of wildfires where boreal forest, forest, rain forest, shrub land, grassland, and other vegetation types

are devastated. In tropical regions, forest ecosystems are mostly affected by large fuel availability. In Mexico factors such as climate, incidence of hurricanes, topography, and soil bring on conditions for wildfires every year [4, 5]. These fires burn large areas of vegetation causing locally several environmental problems and in relative large distances severe conditions of air pollution [6].

Wildfires have negative impacts on the economy of affected countries. Several countries of Africa and Brazil have reported negative effects for tourism activities due to damages caused by wildfires in the vegetation of ecosystems. Countries such as India, Russia, Asia, Canada, and United States also annually reported economic losses by biomass burning [7]. In Mexico, losses of about US\$ 337 million in wood and about US\$ 39 million in reforestation costs have been reported for 2003 [7]. To explain this order of magnitude of economic losses in Mexico, it is convenient to analyze the statistics associated with wildfires. Between 1999 and 2010, a maximum number of about 10000 fires were reported and documented annually in Mexico, reaching the affected area values of 3000 km² [8]. It means that at these rates of

vegetation consumption in 20 years about 3% of the Mexican territory has been devastated by wildfires. However, a large number of wildfires that occur in inhospitable and remote areas are detected only by satellite sensors and they are not documented. The most affected regions are located in the Sierra Madre Oriental and in the southeastern part of Mexico.

There are several factors contributing to initiate the ignition in the established vegetation types. It includes basically human activities and those associated to drought periods [9]. The increase in emissions caused by biomass burning is a global scientific issue due to the generated pollution and to the potential damages associated with the greenhouse effect [2, 10, 11]. Diverse gas emissions by wildfires like carbon dioxide (CO_2), carbon monoxide (CO), NO_x , and water vapor [11–17] which are the result of vegetation burning have been documented worldwide. Kasischke and Penner [18] summarized the results of papers submitted to the meeting sponsored by Global Observation of Forest Cover/Global Observation of Land Dynamics and International Geosphere-Biosphere Program/International Global Atmospheric Chemistry/Biomass Burning Experiment. Chang and Song [19] estimated biomass burning emissions in tropical Asia. They applied burned areas estimated from newly published 1 km L3JRC and 500 m MODIS burned area products (MCD45A1). Relevant for the global warming are those of greenhouse effect like the CO_2 and methane. Another hazardous aspect is that a single wildfire plume of smoke may be transported large distances by wind effect leaving a pollution cloud over inhabited regions. Damoah et al. [20] showed that a plume of smoke from forest fires in Russia traveled over long distances from 10 to 31 of May, 2003. The plume of smoke was observed in several regions of the globe (Canada, Scandinavia, North-Atlantic, Germany, Europe, and Greenland). In this sense, biomass burning may have global implications.

It is difficult to quantify the amount of emitted pollutants into the atmosphere by wildfires, due to multiple factors involved in the ignition [2, 21]. However, there are methods to estimate the amount of produced pollutant in a wildfire by considering some parameters such as forest fuel load, vegetation type, burning efficiency, and burned area. This may represent an advantage for potential pollutant estimations in a wildfire event but may represent a problem when there is not enough information for all parameters. Nevertheless, other sources of data can be included such as satellite images, laboratory data, and field measurements [22].

Despite the complexity to quantify emitted pollutants by wildfires, different methodologies have been applied to estimate values and ranges of CO_2 emissions from biomass burning in different parts of the world. An estimation of CO_2 emissions in Greece yielded an order of magnitude of 2.2 Tg (1 Tg = 106 Ton) [21]. Calculations of emitted CO_2 by wildfires in the State of California, USA, deliver an approximated value of 6 Tg [13]. CO_2 emissions by wildfires in USA in the period 2002–2006 varied in the range 80–213 Tg [23]. An evaluation carried out for Russia and North America on CO_2 emissions by wildfires produced an order of magnitude varying between 828 and 1103 Tg [24]. A global estimation of CO_2 emissions by wildfires in 1994 yielded an approximated value of 5716 Tg

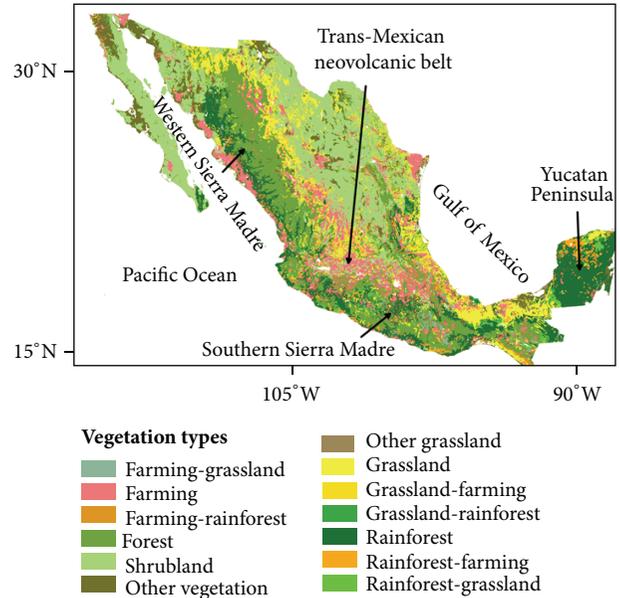


FIGURE 1: Main vegetation groups in Mexico. Groups of vegetation are displayed according to the floristic characteristic and vegetative development. The principal mountain chains and the peninsula of Yucatan are also indicated.

[17]. All these estimated quantities on CO_2 emissions by wildfires have implications on the chemical composition of the atmosphere. Thus it is essential to calculate CO_2 emissions in other regions of the world to understand the influence of this phenomenon, since it alters the carbon biogeochemical cycle and favors the global climate change by greenhouse effects [25–27]. In this research, we present estimations of the total CO_2 emissions by wildfires occurred in Mexico in the period from 1999 to 2010. The calculations are based on satellite information on fire hot spots, land cover, vegetation types, and other sources of information about wildfires.

2. Materials and Methods

Figure 1 shows the main vegetation groups in Mexico, according to the classification given by the National Institute for Statistics, Geography, and Informatics [28]. Different types of vegetation were grouped based on ecological floristic and physiognomic affinities. In the classification system performed by INEGI, was considered the development of vegetation by their degree of disturbance both by natural and anthropogenic causes. Mexico occupies an area of about 1964375 km^2 . From this area, about 2.5% is superficial water (lakes, dams, and rivers). As a first step, the corresponding total area of each type of vegetation was calculated applying GIS (Geographical Information System). In Table 1, it is shown that shrubland occupies the largest area in Mexico with about 25.98% of the total area of Mexico. It is followed by forest with 17.51%, rainforest 14.24%, farming 13.52%, and grassland with 13.25%. These five types of vegetation embrace 84.5% of the total area. Although they were contemplated

TABLE 1: Available and calculated information on the considered ecosystems [29]. This data set was applied to estimate CO₂ emissions.

Vegetation type	Percentage of total area (%)	Biomass load (ton/km ²)	Burning efficiencies
Rainforest	14.24	5000–55000	0.2
Forest	17.51	5000–10000	0.3
Farming	13.52	500–10000	0.4
Grassland	13.25	150–550	0.96
Schrubland	25.98	50–200	0.95
Grassland-farming	1.24	350–5275	0.68
Rainforest-grassland	1.45	2575–27775	0.58
Farming-rainforest	1.16	2750–32500	0.30
Other vegetations	7.1	325	0.95

in the calculation, the rest of the vegetation types embrace percentages of 1–2%.

Although in Mexico thousands of wildfires are documented annually by the National Forest Commission (CONAFOR), there are enormous inaccessible regions where a large number of wildfires occur. The information given by CONAFOR considers only total number of documented wildfires and total affected areas per federal state of the country. The total number of documented wildfires and total affected areas per year for the whole country are given in Figure 2(a). Since the geographical information per federal state is not coincident with the geography of the ecosystems, yearly averaged affected areas per fire for the considered period (1999–2010) were calculated from the available data for the whole country. An alternative to fill the lack of information about all wildfires that occur in Mexico is by using satellite data. For this purpose, daily records of detected hot spots in Mexico for the period 1999–2010 were applied. The data set was obtained from reports issued by the National Commission for Knowledge and Use of Biodiversity (CONABIO). This data are obtained by CONABIO from MODIS (Moderate resolution Imaging Spectroradiometer) and from NOAA-AVHRR (National Oceanic and Atmospheric Administration-Advanced Very High Resolution Radiometer). The data set is the result of statistical analysis and verification of a real incidence of wildfires. From the original data set of hot spots, about 6% of them were eliminated [30]. Figure 2(b) shows the number of hot spots per year in the studied period. The yearly hot spots variability is due to climate factors, to anthropogenic activities, and to satellite feasibility [6, 30, 31]. Although the position of the hot spots is known, information on affected area is not available. For this reason, we applied yearly averaged affected areas from the documented wildfires. We summarize the followed methodology to estimate the emissions of CO₂ by wildfires in Mexico in the period from 1999 to 2010.

- (a) A vegetation type map for México was used. This database was updated in 2005 by the National Institute for Statistics Geography and Informatics (INEGI).
- (b) Historical records of documented forest fires were applied to estimate yearly means (1999–2010) of

affected areas for the whole country. The data set was obtained from reports made by the National Forest Commission (CONAFOR).

- (c) Daily records on the position of hot spots for the period 1999–2010 were applied (CONABIO).
- (d) Applying a GIS approach, the total occupied area in the whole country by every vegetation type was established. Since the position of all hot spots is known, the total number of hot spots per vegetation type was then determined.
- (e) After the statistical analysis and verification about the certainty that the applied hot spots are real wildfires [29], the corresponding yearly mean of affected area was assigned to every hot spot.
- (f) Information on biomass load and biomass burning efficiencies for six types of vegetation was collected [29] (Table 1). For other combined vegetation types, average values for biomass load and burning efficiencies were calculated from the original components.
- (g) The estimation of CO₂ emissions was carried out as follows: the equation proposal by Seiler and Crutzen [32], actualized by Levine [29], was applied:

$$\text{CO}_2(x, y) = \beta C(x, y), \quad (1)$$

where CO₂(x, y) is the amount of carbon dioxide in Mg (1 Mg = 1 Ton) emitted by each forest fire (hot spot). (x, y) means the position (longitude, latitude) of the wildfire. $\beta = 0.90$ is the fraction of emitted CO₂ for tropical vegetation [29]. The variable $C(x, y)$ is written in the form $C(x, y) = \alpha \cdot M(x, y)$, where $M(x, y) = ABE$ (A = burned area in km², B = burned biomass load in Mg/km², and E = burning efficiency). $\alpha = 0.45$ is the percentage of carbon contained in the biomass [29]. From points a–6, all required information was available to estimate the CO₂ emissions by wildfires in Mexico into the atmosphere (Table 1).

3. Results and Discussion

Although the distribution of hot spots was determined for all types of vegetation and for every year applying a GIS process, this procedure is documented in Figures 3(a) and 3(b) for two

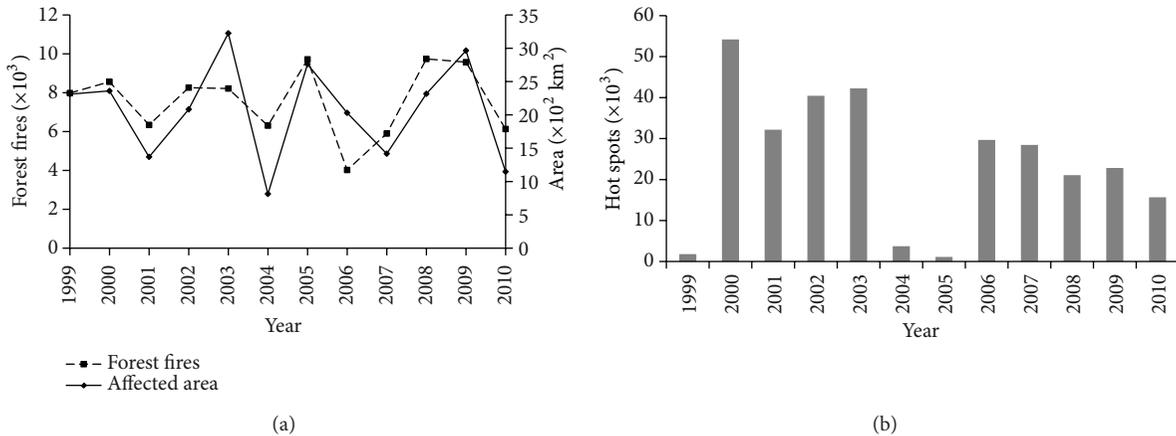


FIGURE 2: Documented number of forest fires and total affected area (CONAFOR) (a); reported number of hot spots (CONABIO) (b).

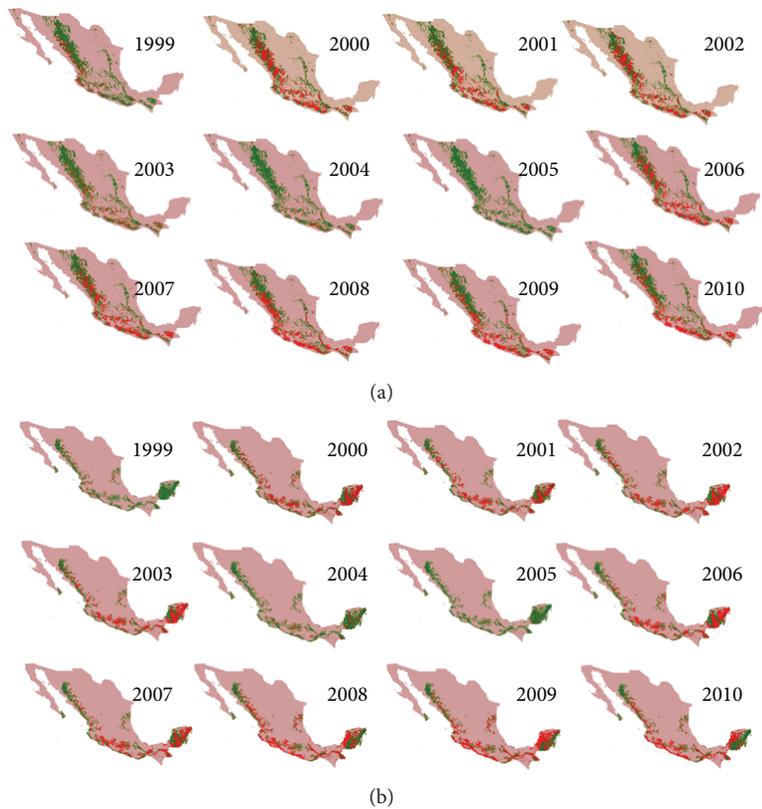


FIGURE 3: Incidence of wildfires in forest (a) and in rainforest (b). Green areas represent the polygon of the vegetation type and the red points symbolize the hot spots.

of the most important vegetation types for CO₂ emissions, that is, for forest and rainforest. The principal incidence of wildfires (red points) in forest (Figure 3(a)) occurs on the western side of Mexico, along the Western Sierra Madre, Southern Sierra Madre, Trans-Mexican Neovolcanic Belt, and Sierra Madre of Chiapas. In contrast, wildfires in rainforest occur dominantly in the Peninsula of Yucatan and along the coastal plains of the Gulf of Mexico and Pacific Ocean (Figure 3(b)). The number of wildfires in each vegetation type

varies from year to year and the incidence of wildfires in different types of vegetation is not necessarily correlated. For example, in 2003 occurred relatively few wildfires in forest but in rainforest the incidence of wildfires was especially high. Even within the same type of vegetation, the distribution of wildfires strongly changes from year to year. It seems that climatic factors like rainfall, humidity, drought periods, and hurricanes influence regionally the potential incidence of wildfires. These climatic factors are reflected in parameters

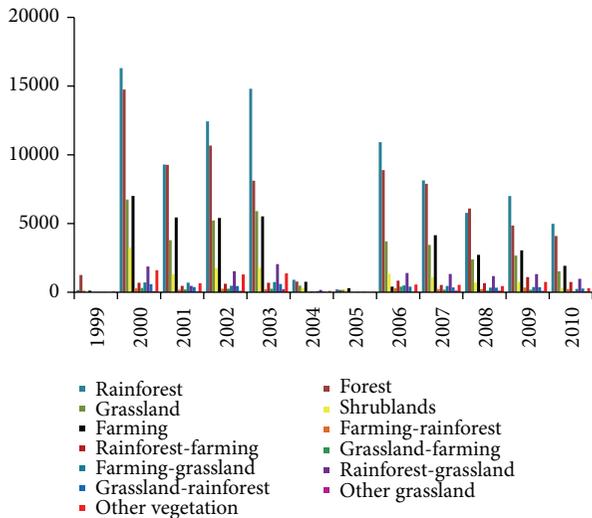


FIGURE 4: Time series of the yearly number of hot spots (wildfires) per vegetation type.

like normalized difference vegetation index (NDVI), relative humidity, relative green maps, fuel availability, and others which are applied to predict conditions for incidence of wildfires and to explain its regional variability. In the Peninsula of Yucatan, in the years 1999, 2004, and 2005, the number of wildfires was small compared with the rest of the years where the density of wildfires was always very high. This analysis reveals the importance of separating the incidence of wildfires in each type of vegetation. This kind of analysis could also provide strategies to prevent the occurrence of wildfires or to be prepared for a possible large incidence of fires. Another important aspect to be analyzed in the question of wildfires is its occurrence in the different types of vegetation. Once the polygons for all considered vegetation types were determined (see Figure 3 for forest and rain forest), the number of hot spots in each type of vegetation was calculated. In order to complete the discussion on the incidence of wildfires in the different types of vegetation, a histogram of yearly accumulated number of hot spots in every vegetation type is given in Figure 4. Although the variability in the number of hot spots seems to be correlated for all vegetation types, there are large changes in the number of hot spots for each vegetation type. For example, for rainforest, the number of hot spots varied from about 16 000 in the year 2000 to only a few hundred in 2005. It is also of interest to remark that there are years with a large number of wildfires in all vegetation types and years where the number of wildfires decreases dramatically. In the period of time considered (1999–2010), a recurrent minimum in the number of wildfires seems to occur every 5–6 years. In years with a minimum number of detected hot spots, there are even vegetation types without any incidence of wildfires.

Once the total yearly number of wildfires was determined for every type of vegetation, the corresponding yearly mean of affected area was then applied. In Figure 5(a), yearly means of affected areas, calculated from the total documented wildfires by the National Forest Commission, are displayed. Due to

the scarce regional information about affected areas by every wildfire, we had to calculate a yearly mean affected area for the whole country. With the information on yearly mean affected area and with the yearly number of wildfires, it was possible to estimate the yearly affected area for every type of vegetation and the total yearly affected area. Comparison of yearly mean affected area and total yearly affected area considering all wildfires in all types of vegetation indicates that these two variables are occasionally positively and sometimes negatively correlated (Figures 5(a) and 5(b)). In 2004, a small yearly mean affected area coincided with a small total affected area by all wildfires. On the contrary, in 2005, a relative large yearly mean affected area is negatively correlated with a very small total affected area. The number of hot spots in 2005 was the smallest in the considered period. Considering that the CONAFOR documented in this year about 9000 wildfires, it is obvious that there were problems with the detection or availability of hot spots for CONABIO. In the years 2003 and 2006, a positive correlation takes place; that is, large yearly means affected areas coincide with large total affected areas considering all wildfires. From this analysis on affected areas, for example, large yearly mean affected areas and very small total yearly affected areas, the importance of regionally well-documented wildfires acquires relevance. The total yearly affected area seems to have a large variability, whereas the yearly mean affected area per wildfire remains dominantly in the same order of magnitude, about $0.2\text{--}0.3\text{ km}^2$. The total affected area during the period 1999 to 2010 was approximately 86800 km^2 which corresponds to about 4.3% of the Mexican territory.

By applying (1) and using the number of wildfires, yearly means of affected areas, the biomass load, and burning efficiencies for each vegetation type, the total yearly emissions of CO_2 into the atmosphere by wildfires were estimated. It is important to mention that due to the wide variety of vegetations in Mexico, there is still insufficient information about total forest fuel per area for each type of vegetation. However, we consider that the collected information about biomass load and burning efficiencies could yield a good order of magnitude of total yearly emissions of CO_2 . The total yearly emissions of CO_2 , T_E were then calculated from the sum of all emissions. To analyze the role played by every type of vegetation in the total yearly emissions (T_E), time series of the percentage of emissions of CO_2 for every type of vegetation is given in Figure 6. Whereas for rainforest, forest, and grassland, their percentages in the total emissions remain largely the same, and there are other vegetation types with a growing influence like grassland-rainforest, rainforest-farming, and rainforest-grassland. The principal problem in Mexico related to wildfires is in rainforest regions where about 50–60% of the total emissions of CO_2 to the atmosphere occur. It is followed by forest regions with about 20% of the total emissions. The emissions by the vegetation type rainforest-farming grew from about 2% in 1999 to 7% in 2010, and this could be a warn signal for the CONAFOR. Although the percentages of emissions by farming areas show some oscillations, they remain approximately between 6 and 10%. Other vegetation types, farming-grassland, and shrubland reach values around 1%. Although the available

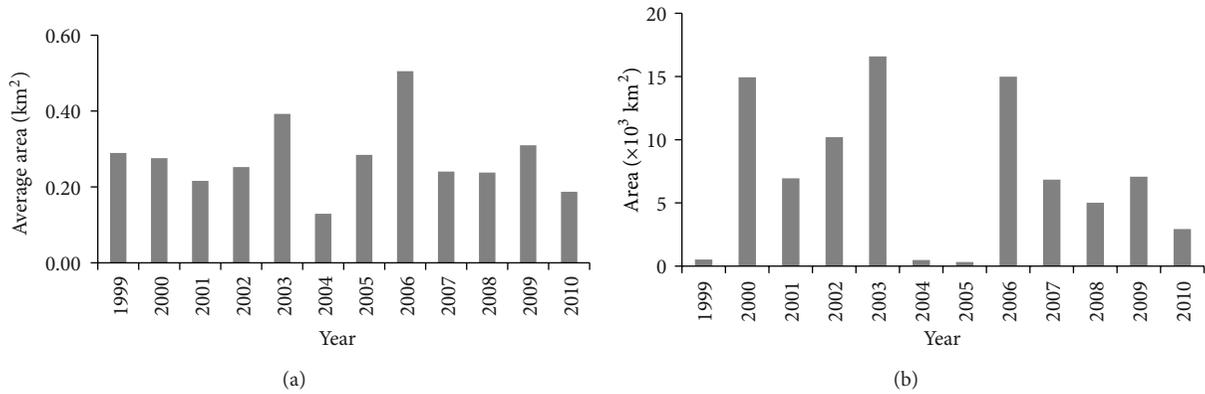


FIGURE 5: Mean affected area per fire obtained from documented wildfires (CONAFOR) (a) and total affected area considering all reported hot spots in all vegetation types (CONABIO) (b).

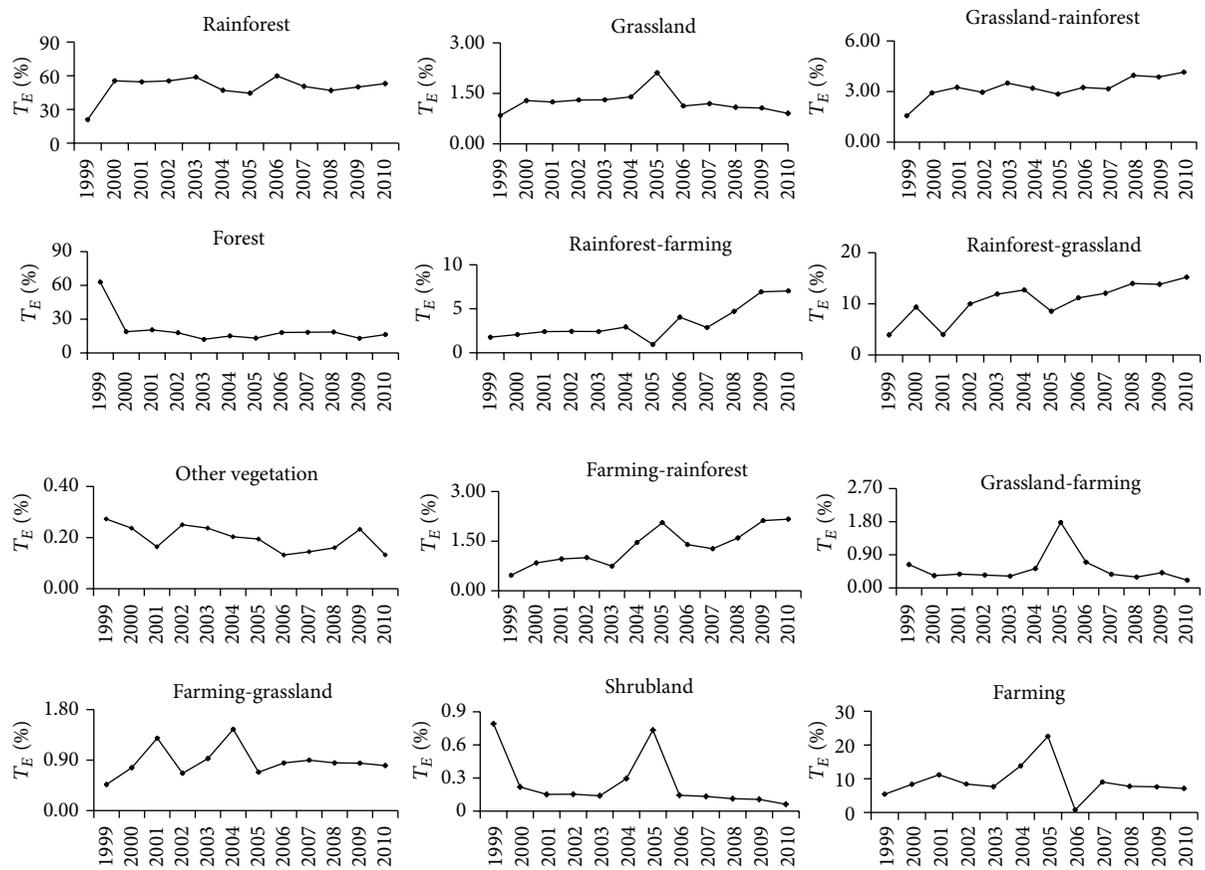


FIGURE 6: Time series of the percentages of each vegetation type in relation to the total yearly emissions. The considered period is from 1999 to 2010.

information is scarce, we think that this analysis reveals very well what is happening in the; therefore it could be relevant to the design of firefighting strategies.

3.1. Total Emissions of CO₂. We have carried out a careful analysis on the distribution of wildfires in the different ecosystems and we have discussed about the relative importance of the vegetation types in the emissions of CO₂ to the

atmosphere. It allowed for obtaining information on the tendencies in the incidence of wildfires in the vegetation types. It was possible to determine total affected areas separately, that is, in every vegetation type and for every year in the considered period. The principal aim of this research work was to estimate the total emissions of CO₂ considering the incidence of the wildfires for the main groups of vegetation in Mexico. In Figure 6, the percentage of yearly emissions of CO₂ for every ecosystem was displayed. It provided relevant

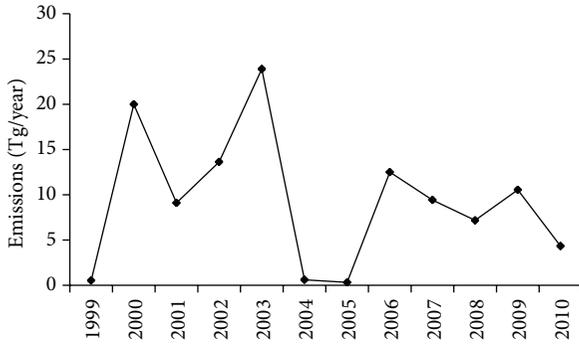


FIGURE 7: Total yearly emissions of CO₂ in Mexico during the period 1999 to 2010 considering all vegetation types.

evidence about the tendencies related to the emissions by wildfires in every type of vegetation. We consider that the knowledge about the tendency of damages of vegetation types by wildfires is very important to establish policies to protect threatened areas. In Figure 7, the time series of the yearly total emission of CO₂ by wildfires during the period 1999–2010 in Mexico is given. The total emission of CO₂ for this period is 112 Tg and the annual mean is 9.3 Tg with a standard deviation of 7.5 Tg. The estimated quantities in this work are relevant because it gives an idea about the tons of CO₂ emitted into the atmosphere and its impact on the greenhouse effect. The most affected regions due to these emissions are located in the southern part and in the peninsula of Yucatan. It corresponds to areas with forest and rainforest (see Figure 3). The results reflect the magnitude of the problem of air pollution, principally in the months with major presence of wildfires which regularly occur from January to May, although in some years it extends until August [6]. It is important to mention that the presented results may have uncertainties in the estimation of total yearly emissions of CO₂, due to the lack of information or due to the form in which available data were applied. The documentary sources provide only the available information but it is not the required, and it is incomplete. However, the results are relevant because they provide a quantitative idea about the emissions of CO₂ generated by forest fires that occur in Mexico every year. We are aware that currently there is a degree of uncertainty about the magnitude of CO₂ emissions by biomass burning. The same occurs with the pollution affecting the air quality in urban areas near regions with a high incidence of forest fires with the corresponding CO₂ emissions. The difficulties that we found to estimate the CO₂ emissions by wildfires in Mexico have been with approximations riddled, but the principal barrier was that wildfires are not well documented. Finally in Table 2, we compare the results obtained in this work with other estimations realized in different parts of the world and with different methodology.

4. Conclusions

Using available data like documented wildfires, the position of satellite-detected hot spots, biomass load for every type

TABLE 2: Reported values of CO₂ emissions by forest fires in different parts of the world.

CO ₂ emissions in Tg	Site
2.2	Greece [21]
6	California (USA) [13]
112	This work—Mexico (1999–2010)
147	USA [23]
966	Russia North America [24]
5716	Global [17]

of vegetation, and biomass burning efficiencies, important information on yearly variability and distribution of wildfires was obtained. We found that emissions of carbon dioxide (CO₂) due to wildfires represent a problem that affects predominantly the vegetation types: rainforest, forest, grassland, and farming in Mexico. The total CO₂ emissions to the atmosphere during the period 1999 to 2010 were of the order of 112 Tg, with a yearly mean emission of about 9.3 Tg. According to our results, the emissions of CO₂ to the atmosphere by wildfires are in the order of magnitude of those reported in other studies realized in different parts of the world. In the same period, an area of approximately 86800 km² was affected by the wildfires. The analysis on the incidence of wildfires in different types of vegetation revealed interesting aspects about the relative importance of each ecosystem. We found that the relative significance of forest and rainforest in the question of wildfires remained approximately constant in the period 1999–2010. In contrast, the relative importance of rainforest-farming and rainforest-grassland is continuously growing. Since there are in Mexico vast inaccessible regions where also a large number of wildfires occur, our estimations acquire importance because the whole Mexican territory was considered through the detected hot spots in the calculation of total yearly emissions of CO₂. We are aware that there is a lot of work to be in a position where better estimations for the emissions of CO₂ can be carried out, but we consider our results as an important first step in that direction.

Conflict of Interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this paper.

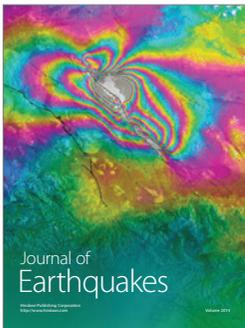
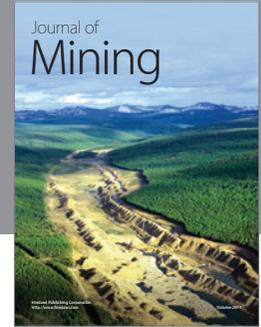
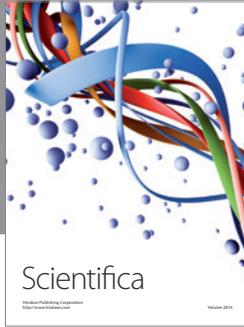
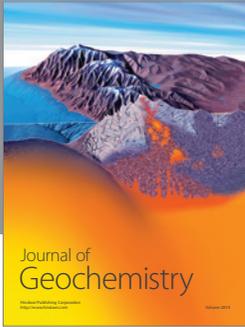
Acknowledgment

The authors thank the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) for the partial support of this research CB-2011-C01-168011.

References

- [1] M. A. Cochrane, “Fire science for rainforests,” *Nature*, vol. 421, no. 6926, pp. 913–919, 2003.
- [2] J. S. Levine, T. Bobbe, N. Ray, A. Singh, and R. G. Witt, “Wildland fires and the environment: a global synthesis,” Tech. Rep. UNEP/DEIAEW/TR. 99-1, 1999.

- [3] C. N. Skinner and C. Chang, "Fire regimes, past and present. Vol II. Assessments and scientific basis for management options," Wildland Resources Center Report 37, Centers for Water and Wildland Resources, University of California, Davis, Calif, USA, 1996.
- [4] J. Sarukhán, *Capital Natural de México. Síntesis: Conocimiento Actual, Evaluación y Perspectivas de Sustentabilidad*, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Tlalpan, México, 2009.
- [5] V. Sosa and P. Davila, "Una evaluación del conocimiento florístico de México," *Annals of the Missouri Botanical Garden*, vol. 81, no. 4, pp. 749–757, 1994.
- [6] L. Villers-Ruiz and J. López-Blanco, *Incendios Forestales en México. Métodos de Evaluación*, Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Distrito Federal, México, 2004.
- [7] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), *Fire Management Global Assessment*, 2006.
- [8] Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), "Reports issued weekly," 2010, <http://www.cnf.gob.mx:8080/snif/portal/las-demas/reportes-de-incendios-forestales>.
- [9] M. J. McPhaden, "El Niño and La Niña: causes and Global Consequences. Volume I, the Earth System: physical and chemical dimensions of global environmental change," in *Encyclopedia of Global Environmental Change*, M. C. MacCracken and J. S. Perry, Eds., pp. 353–370, 2002.
- [10] M. A. Cochrane, "Synergistic interactions between habitat fragmentation and fire in evergreen tropical forests," *Conservation Biology*, vol. 15, no. 6, pp. 1515–1521, 2001.
- [11] J. Contreras-Moctezuma, D. A. Rodríguez-Trejo, A. Retama-Hernández, and J. J. M. Sánchez-Rodríguez, "Gases del humo de incendios en bosques de pinus hartwegii," *Agrociencia*, vol. 37, no. 3, pp. 309–316, 2003.
- [12] J. M. Lobert, D. H. Scharffe, W. M. Hao et al., "Experimental evaluation of biomass burning emissions: nitrogen and carbon containing compounds," in *Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic and Biospheric Implications*, J. S. Lavine, Ed., pp. 289–304, MIT Press, Cambridge, Mass, USA, 1991.
- [13] N. E. Clinton, P. Gong, and K. Scott, "Quantification of pollutants emitted from very large wildland fires in Southern California, USA," *Atmospheric Environment*, vol. 40, no. 20, pp. 3686–3695, 2006.
- [14] D. F. Hurst, D. W. T. Griffith, J. N. Carras, D. J. Williams, and P. J. Fraser, "Measurements of trace gases emitted by Australian savanna fires during the 1990 dry season," *Journal of Atmospheric Chemistry*, vol. 18, no. 1, pp. 33–56, 1994.
- [15] M. O. Andreae and P. Merlet, "Emission of trace gases and aerosols from biomass burning," *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 15, no. 4, pp. 955–966, 2001.
- [16] T. J. Christian, B. Kleiss, R. J. Yokelson et al., "Comprehensive laboratory measurements of biomass-burning emissions: 1. Emissions from Indonesian, African, and other fuels," *Journal of Geophysical Research D*, vol. 108, no. 23, article 16, 2003.
- [17] J. J. Hoelzemann, M. G. Schultz, G. P. Brasseur, C. Granier, and M. Simon, "Global Wildland Fire Emission Model (GWEM): evaluating the use of global area burnt satellite data," *Journal of Geophysical Research D*, vol. 109, no. D14, article 27, 2004.
- [18] E. S. Kasichke and J. E. Penner, "Improving global estimates of atmospheric emissions from biomass burning," *Journal of Geophysical Research D*, vol. 109, no. 14, pp. D14–S01, 2004.
- [19] D. Chang and Y. Song, "Estimates of biomass burning emissions in tropical Asia based on satellite-derived data," *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 9, pp. 19599–19640, 2009.
- [20] R. Damoah, N. Spichtinger, C. Forster et al., "Around the world in 17 days—hemispheric-scale transport of forest fire smoke from Russia in May 2003," *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 4, no. 5, pp. 1311–1321, 2004.
- [21] M. Lazaridis, M. Latos, V. Aleksandropoulou, O. Hov, A. Papayannis, and K. Tørseth, "Contribution of forest fire emissions to atmospheric pollution in Greece," *Air Quality, Atmosphere and Health*, vol. 1, no. 3, pp. 143–158, 2008.
- [22] J. S. Levine, "Global Biomass Burning: a case study of the gaseous and particulate emissions released to the atmosphere during the 1997 fires in Kalimantan and Sumatra, Indonesia," in *Biomass Burning and Its Inter-Relationships with the Climate System*, vol. 3 of *Advances in Global Change Research*, pp. 15–31, 2000.
- [23] C. Wiedinmyer and J. C. Neff, "Estimates of CO₂ from fires in the United States: implications for carbon management," *Carbon Balance and Management*, vol. 2, no. 1, article 10, 2007.
- [24] E. S. Kasichke and L. P. Bruhwiler, "Emissions of carbon dioxide, carbon monoxide, and methane from boreal forest fires in 1998," *Journal of Geophysical Research D*, vol. 108, no. 1, pp. 2–14, 2003.
- [25] J. W. Raich and W. H. Schlesinger, "The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate," *Tellus B*, vol. 44, no. 2, pp. 81–99, 1992.
- [26] P. M. Fearnside, "Global warming and tropical land-use change: greenhouse gas emissions from biomass burning, decomposition and soils in forest conversion, shifting cultivation and secondary vegetation," *Climatic Change*, vol. 46, no. 1-2, pp. 115–158, 2000.
- [27] N. Gruber and J. N. Galloway, "An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle," *Nature*, vol. 451, no. 7176, pp. 293–296, 2008.
- [28] INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), *Guía Para la Interpretación de Mapa de Usos de Suelo y Vegetación*, Escala 1:250000: Series III/ INEGI, Aguascalientes, México, 2009.
- [29] J. S. Levine, "Biomass burning: the cycling of gases and particulates from the biosphere to the atmosphere," in *Treatise on Geochemistry, the Atmosphere*, R. F. Keeling, Ed., Elsevier, 2003.
- [30] R. Ressler, G. Lopez, I. Cruz et al., "Operational active fire mapping and burnt area identification applicable to Mexican Nature Protection Areas using MODIS and NOAA-AVHRR direct readout data," *Remote Sensing of Environment*, vol. 113, no. 6, pp. 1113–1126, 2009.
- [31] S. J. Wright, "Tropical forests in a changing environment," *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 20, no. 10, pp. 553–560, 2005.
- [32] W. Seiler and P. J. Crutzen, "Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning," *Climatic Change*, vol. 2, no. 3, pp. 207–247, 1980.



Hindawi

Submit your manuscripts at
<http://www.hindawi.com>

