



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

POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

**Estimación de áreas afectadas por incendios forestales y
dispersión de aerosoles emitidos.**

Tesis que presenta
Yoendris Rosales Sánchez

Para obtener el grado de
Maestro en Geociencias Aplicadas

Director de la Tesis:
Dr. José Noel Carbajal Pérez

San Luis Potosí, S.L.P. abril de 2019



Constancia de aprobación de la tesis

La tesis “**Estimación de áreas afectadas por incendios forestales y dispersión de aerosoles emitidos**” presentada para obtener el Grado de Maestro en Geociencias Aplicadas, fue elaborada por **Yoendris Rosales Sánchez** y aprobada el **día 12 de abril de 2019** 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

Director de la tesis

Dr. José Tuxpan Vargas

Miembro del Comité Tutoral

Dr. José Alfredo Ramos Leal

Miembro del Comité Tutoral



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.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (619738) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.

A mis hijos por ser mi máxima motivación...

A mi esposa por su sacrificio, abnegación y entrega aún desde la distancia...

A mi madre por darme la vida y una carrera...

A mi tía y algo suyo que llevo dentro...

Agradecimientos

Cualquier trabajo en la vida por pequeño que sea lleva detrás la mano de otras personas e instituciones. Nada se hace solo ni de la nada. En la realización de esta investigación muchas fueron las personas que colaboraron, desde amigos cercanos, a distancia y hasta los nuevos amigos que surgieron dentro del propio proceso. Instituciones, colectivo de profesores, familiares y hasta enemigos con sus críticas orientaron de cierta forma el trabajo. Sería verdaderamente amplia esta sección si le dedicara mínimo una línea a cada uno de ustedes, pero siempre les hare saber mi agradecimiento. Por eso trataré de mencionar aquellas personas e instituciones que sin su apoyo no hubiese sido posible la finalización de esta tesis...

En primer lugar, a mi asesor y al comité académico, los doctores Noel Carbajal, José Tuxpan y José Alfredo, respectivamente. Ellos fueron clave en el conocimiento aprendido y aplicado. Fueron guía de cada paso recorrido y rectificado. A los tres, gracias por llevarme de la mano en este nuevo camino de la investigación.

En segundo lugar, a la beca académica otorgada por CONACYT y al IPICYT por abrirme las puertas a México, sus líneas de investigación y sus investigadores. Dentro del IPICYT, a las hermosas y talentosas chicas del departamento de postgrado, Ivón, Edith y Teresa. Su ayuda fue clave para mi adaptación y recorrido en este instituto. Además de los profesores, trabajadores y compañeros de clases de la división de Geociencias Aplicadas, gracias por sus enseñanzas y debates.

En tercer lugar, a mi gran país Cuba, que a pesar de ser una pequeña isla con un inmenso bloqueo continúa dejando crecer sus profesionales. Al Instituto de Meteorología (INSMET) y su director Dr Celso, por su confianza y apoyo a sus trabajadores realicen postgrados en el extranjero. Al Dr. Cuesta, director del Centro de Química y Contaminación de la Atmósfera (CECONT) y su equipo de trabajo al cual pertenezco desde la distancia. Al Centro Meteorológico Provincial (CMP) de Granma, su director ing. Marcelo Cid y sus trabajadores, especialmente la Ing. Teresa Acosta, especialista principal del grupo científico y área donde trabajo en este centro. Todos ellos hicieron posible mi deseo de superación y aprendizaje en el extranjero.

A mi familia por confiar en mí y sacrificar juntos estos dos años de distanciamiento y apoyo virtual, especialmente mi esposa y mis dos hijos que fueron los más sufridos en este distanciamiento. A mis madres que estuvieron detrás del consejo oportuno y de la palabra precisa para no cejar en este empeño. A mi tía que se encargó de administrar mis bienes económicos y situaciones laborales en mi ausencia.

A mis amigos hermanos que siempre están apoyando con su conocimiento, sabiduría, experiencia y hasta economía, especialmente los Mrs, Yordanis Puertas, Adonis Ramón y Alex Lester. A mi otra madre, Martha Calvo, guía espiritual y de brazo fuerte que sabe qué hacer y qué decirle a un hijo en el momento justo y oportuno.

A todos, muchas gracias....les estaré eternamente agradecido

CONTENIDO

INTRODUCCION	1
Objetivos:	2
Antecedentes y justificación	3
CAPITULO 1: ASPECTOS TEÓRICOS METODOLÓGICOS	7
1.1. Incendios forestales. Generalidades.....	8
1.2. Detección de áreas quemadas.....	12
1.3. Emisión de gases y aerosoles.....	13
1.4. Metodología.....	15
CAPITULO 2: CARACTERIZACION GENERAL DEL TERRITORIO.....	23
2.1. Ubicación geográfica.....	23
2.2 Características físico-geográficas.....	23
2.2.1. Geología y Relieve.....	24
2.2.3 Clima e Hidrología	26
2.2.4. Suelo y Vegetación	31
2.3. Características socioeconómicas	36
2.3.1. Población y Poblamiento.....	36
2.3.2 Actividades económicas	38
CAPITULO 3: ÁREAS QUEMADAS Y BIOMASA AFECTADA EN LA PENÍNSULA DE YUCATAN	42
3.1. Comportamiento de los Incendios forestales.....	42
3.2. Estimación de áreas quemadas	46
3.3. Estimación de biomasa.	49
CAPITULO 4: EMISIÓN DE GASES Y AEROSOLAS EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN	52
4.1. Estimación de gases y material particulado	53
4.2. Dispersión de gases y aerosoles	54
CAPITULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	58
CONCLUSIONES.....	65
RECOMENDACIONES	66
BIBLIOGRAFÍA	67

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Frecuencias de incendios forestales en México 1999.2010. Tomado de Bautista Vicente, 2015.</i>	11
<i>Figura 2: organigrama de investigación.</i>	17
<i>Figura 3: Organigrama de áreas quemadas.</i>	17
<i>Figura 4: Índices de áreas quemadas.</i>	18
<i>Figura 5: Índice normalizado de áreas quemadas (NBR), a la derecha, visible color real a la izquierda.</i>	19
<i>Figura 6: Intercepción de las capas NBR y Buffer de calor.</i>	20
<i>Figura 7: Ubicación geográfica, Península Yucatán (imagen tomada de internet)</i>	23
<i>Figura 8: Clasificación geológica de la Península Yucatán (SEDUMA, Yucatán).</i>	24
<i>Figura 9: Rosa de vientos, interior Península Yucatán (SEDUMA, Yucatán).</i>	28
<i>Figura 10: Precipitación y Temperatura media anual, Yucatán. Elaborado a partir de datos INEGI.</i>	30
<i>Figura 11: Tipos de suelos, Península de Yucatán, 2016. Elaborado a partir de datos de INEGI.</i>	32
<i>Figura 12: Regímenes de humedad del suelo, Península de Yucatán. 2016. Elaborado a partir de datos de INEGI.</i>	34
<i>Figura 13: Uso del suelo. Península de Yucatán, 2016. Elaborado a partir de datos INEGI.</i>	35
<i>Figura 14: Pirámides de Población, INEGI 2015. Yucatán (a), Quintana Roo (b), Campeche (c).</i>	37
<i>Figura 15: Aporte al PIB según sectores económicos, INEGI 2015. Yucatán (a), Quintana Roo (b), Campeche (c).</i>	37
<i>Figura 16: Puntos de calor, según estado y año. Península de Yucatán. Elaborado con datos de CONABIO. 2000 – 2017.</i>	43
<i>Figura 17: Puntos de Calor según mes y estado. Península de Yucatán 2000 - 2017. Elaborado a partir de CONABIO.</i>	44
<i>Figura 18: Puntos de calor (media anual), según municipios. Península de Yucatán 2000 - 2017. Elaborado con datos de CONABIO.</i>	45
<i>Figura 19: Puntos de calor, Península de Yucatán, 2017. Elaborado con datos de CONABIO.</i>	46
<i>Figura 20: Áreas quemadas, según mes de la temporada de incendios 2017.</i>	47
<i>Figura 21: Áreas quemadas en la temporada de incendios 2017.</i>	48
<i>Figura 22: Vegetación quemada, temporada de incendios 2017, Península de Yucatán (fragmento).</i>	50

<i>Figura 23: Emisiones (Tm) estimadas de gases y aerosoles (seleccionados) por incendios forestales. Península de Yucatán, temporada 2017.</i>	53
<i>Figura 24: Sensor VIIRS del día 25 de abril de 2017. (https://eoimages.gsfc.nasa.gov/images/imagerecords/90000/90142/yucatan_vir_2017115_geo.tif)</i>	56
<i>Figura 25: Sensor MODIS del día 6 de mayo 2006. (https://eoimages.gsfc.nasa.gov/images/imagerecords/16000/16483/yucatan_amo_2006126_lrg.jpg)</i>	57
<i>Figura 26: Superposición de área quemada con imagen Google Earth.</i>	59
<i>Figura 27: Geometría característica de la vegetación quemada.</i>	61

RESUMEN

La **Estimación de áreas afectadas por incendios forestales y dispersión de aerosoles emitidos**, está orientada al análisis de las áreas devastadas y los gases emitidos por un incendio forestal. Los incendios forestales queman al año considerables toneladas de biomasa con la emisión de grandes cantidades de gases y aerosoles. El principal objetivo es estimar el tamaño de los incendios, la biomasa quemada y gases emitidos a la atmósfera así como la dispersión de aerosoles. La emisión de gases nocivos a la atmosfera por incendios forestales constituye un problema ambiental creciente. Utilizando técnicas de Sistemas Información Geográfica y procesamiento digital de imágenes satelitales fue posible determinar las áreas quemadas para la temporada de incendios 2017 en la península de Yucatán. La biomasa afectada fue determinada con la superposición de capas de vegetación y áreas quemadas y el empleo de índices de carga de biomasa por hectárea para los diferentes tipos de vegetación. Se estimó la cantidad y tipo de gases emitidos a partir de factores de emisión establecidos. Se calcularon valores cercanos a las 130 mil hectáreas quemadas en la temporada de incendios 2017 para la Península de Yucatán. La biomasa quemada fue del orden de 12.4 millones de megagramos (Mg). La metodología aplicada para la determinación de áreas devastadas por incendios forestales y la correspondiente estimación de biomasa quemada puede ser extendida a otras regiones con problemas ambientales similares.

Palabras claves: Incendios, SIG, imágenes satelitales, emisión de gases

ABSTRACT

The **estimation of areas affected by forest fires and dispersion of aerosols emitted**, is oriented to the analysis of the devastated areas and the gases emitted by a forest fire. The forest fires burn considerable year tons of biomass with the emission of large amounts of gases and aerosols. The main objective is to estimate the size of the fires, the biomass burned and gases emitted into the atmosphere as well as the dispersion of aerosols. The emission of harmful gases into the atmosphere by forest fires is a growing environmental problem. Using GIS techniques and digital processing of satellite images it was possible to determine the burned areas for the 2017 fire season in the Yucatan peninsula. The biomass affected was determined with the superposition of layers of vegetation and burned areas and the use of indices of burden of biomass per hectare for different types of vegetation. It was estimated the amount and type of gases emitted from emission factors. We calculated values close to 130 thousand hectares burned in the fire season 2017 for the Yucatan Peninsula. The biomass burned was of the order of 12.4 million of Mg. The methodology applied for the determination of areas devastated by forest fires and the corresponding estimate of biomass burned can be extended to other regions with similar environmental problems.

Keywords: Fires, GIS, satellite imagery, gas emission

INTRODUCCION

Desde la conquista del fuego por los ancestros del hombre, este lo ha usado con muchos fines. Desde su protección contra el frío, animales peligrosos hasta la caza, la defensa y conquista de nuevos territorios. Desde entonces el fuego ha estado cercano a la actividad del hombre hasta el presente. La aparición de la agricultura contemporánea trajo el fuego para la eliminación de residuos agrícolas y a la ampliación de nuevas tierras de cultivos. Los incendios de la cubierta vegetal han existido por siempre, primero de forma natural, segundo de forma antrópica y ahora combinados.

En la actualidad con el acentuamiento del cambio climático y sus efectos en el aumento de las temperaturas, disminución de las lluvias y prolongación de sequías los incendios forestales se han incrementado. Las regiones tropicales son las más afectadas por estos incendios sumados a los provocados por el hombre ya se accidental o intencionalmente.

Los incendios forestales constituyen una problemática ambiental por sus consecuencias negativas en la biota que forma los ecosistemas de las zonas incendiadas así como por la emisión de numerosos gases y partículas a la atmósfera. Estas emisiones que desencadenan un grupo de procesos relacionados con la física y la química de la atmósfera; tales como, la microfísica de nubes, incremento del efecto invernadero, disminución del ozono estratosférico y aumento del ozono troposférico (el primero beneficioso, el segundo dañino), contaminación del aire, etc.

La pérdida de áreas forestales en todo el mundo aumentó un 51% en 2016 alcanzando el récord de 29,7 millones de hectáreas, según un informe del Global Forest Watch (GFW). Los incendios forestales y la deforestación pueden llevar a un aumento de muertes prematuras, enfermedades y un impacto económico muy negativo. También pueden afectar las fuentes de agua, la biodiversidad y la liberación de grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera, *publicaba la revista electrónica científica, Tendencias21.*

Los incendios producen aproximadamente la mitad de las emisiones de gases de efecto invernadero proveniente de la deforestación y un veinte por ciento de las emisiones totales originadas por actividad humana (Gallardo Lancho, 2009) *de (Bowman et al. 2009)*.

La principal problemática en el estudio de los incendios forestales constituye, precisamente, determinar el tamaño de los mismos. Las metodologías establecidas para la estimación tanto de la biomasa quemada como de los gases emitidos por los incendios forestales están sujetas a la superficie quemada y tipo de vegetación.

De ahí la necesidad de investigar sobre las vías posibles para determinar el área afectada por un incendio forestal. El presente trabajo, desarrolla una metodología para la estimación de estas áreas con un nivel de precisión bastante bueno. Para ello se establecieron los siguientes objetivos:

Objetivos:

- **Estimar las áreas afectadas por incendios forestales y sus emisiones de gases y aerosoles.**

Para lograr este objetivo se identificaron los siguientes objetivos específicos:

- Cartografiar las áreas afectadas por incendios forestales en la Península de Yucatán, durante la temporada de incendios 2017.
- Identificar el tipo y la extensión de la vegetación afectada por los incendios forestales.
- Determinar la biomasa quemada y la emisión de gases y aerosoles devenidos del proceso de combustión.

La metodología se basa, fundamentalmente, en el uso de imágenes satelitales LANDSAT 8, con resolución espacial de 30 m, y técnicas de procesamiento digital complementadas con herramientas de análisis espacial. De esta forma se logró estimar las hectáreas quemadas, las cuales fueron utilizadas con los factores de emisión para obtener la fracción de gases y aerosoles emitidos.

El presente documento de Tesis está estructurado en cinco capítulos que explican la teoría y metodología detrás de los incendios forestales hasta los resultados y sus análisis de esta investigación. Los mismos se resumen a continuación.

- **Capítulo 1.** Aspectos Teóricos y Metodológicos: muestra los aspectos detallado del procedimiento seguido para la estimación de las áreas quemadas, la biomasa quemada y la emisión de los gases.
- **Capítulo 2.** Caracterización general del territorio: es de suma importancia conocer las características físico-geográficas y aspectos socioeconómicos generales, del territorio objeto de estudio, para entender condiciones locales relacionadas con los incendios.
- **Capítulo 3.** Áreas quemadas y biomasa afectada en la Península de Yucatán: En este capítulo se muestran los resultados iniciales obtenidos. Se presenta un análisis estadístico de los incendios y la estimación de las áreas y la biomasa quemada.
- **Capítulo 4.** Emisión de gases y aerosoles en la Península de Yucatán: expone los resultados referentes a estimación de gases y aerosoles por los incendios de la temporada 2017 con respecto a cada estado y tipo de vegetación afectada.
- **Capítulo 5.** Análisis de resultados: se enumeran los principales resultados alcanzados en la investigación y se describen aspectos fundamentales en su comprensión y discusión. ~~Algunos como validación, resultados previos, etc.~~

Antecedentes y justificación.

Los primeros estudios sobre el impacto de la quema de biomasa en la química de la atmósfera fueron publicados en la década de 1970 y principios de 1980 [e.g., Egan et al., 1974; Radke et al., 1978; Crutzen et al., 1979]. El interés científico en este tema creció cuando las primeras estimaciones de las emisiones pirogénicas sugirieron que para algunos contaminantes atmosféricos generados por quema de biomasa podría rivalizarse con el uso de combustibles fósiles como fuente de contaminación atmosférica [Seiler y Crutzen, 1980; Crutzen y Andreae, 1990] y cuando se hizo evidente que estas emisiones podían afectar grandes áreas del

mundo como consecuencia del transporte a larga distancia [Andreae, 1983; Kirchhoff y Nobre, 1986; Reichle et al., 1986; Fishman et al., 1990] de (Badarinath, Kharol, & Sharma, 2009).

Desde entonces muchos grupos de trabajos, organizaciones y proyectos se sumaron a la tarea de investigar los incendios forestales y las emisiones asociadas a ellos. En primera instancia de manera global y recientemente realizando estimaciones regionales.

En las últimas 2 décadas los esfuerzos de los grupos individuales por caracterizar las emisiones de incendios se han extendido ampliamente. Se ha coordinado un número de experimentos de quema de biomasa en diversos ecosistemas en todo el mundo, a menudo bajo los auspicios de La Química Atmosférica Global Internacional (IGAC) proyecto del programador Internacional Geosfera-Biosfera (IGBP). Ejemplos de estos experimentos son Dynamique et Chimie Atmosphérique et Forêt Equatoriale-fuego de las sabanas (DECAFE-FOS) en África del oeste [Lacaux et al., 1995], iniciativa de investigación atmósfera de fuego en Sudáfrica (SAFARI 92) [Andreae et al., 1996c; Lindesay et al., 1996], Transporte y Química Atmosférica cerca del Ecuador Atlántico (TRACE-A) sobre Brasil, sur de África y el Atlántico Sur [Fishman et al., 1996], experimento Regional Fuentes y Sumideros de oxidantes en África Central (EXPRESSO) [Delmas et al., 1999], Humo, Nubes y Radiación-Brasil (SCAR-B) en Brasil [Kaufman et al., 1998] e Investigación de la Campaña de Incendios en Asia del Norte (FIRESCAN) en Siberia central [FIRESCAN ciencia equipo, 1996]. Estos estudios coordinados y numerosas investigaciones pequeñas e independientes han dado lugar a un gran cuerpo de información sobre las características de emisión de incendios de biomasa. Estos datos describen cualitativa y cuantitativamente la emisión pirogénica de gases química y radiactivamente importantes y especies de aerosol (Andreae & Metlet, 2001).

En estos estudios ha sido de gran ayuda e importancia, el desarrollo de la ciencia y tecnología asociado a la teledetección de la tierra. La aparición de sensores de mejor resoluciones radiométricas, espectrales, temporales y espaciales ha dado un

salto significativo en el análisis de las transformaciones de la cobertura vegetal, no solo por incendios.

Las observaciones aéreas y satelitales han demostrado niveles elevados de O₃, CO y otros gases traza sobre vastas zonas de África, América del sur, el Atlántico tropical y los océanos Índico y Pacífico [Andreae et al., 1988; Watson et al., 1990; Fishman et al., 1991; Andreae et al., 1994; Cahoon et al., 1994; Folk's et al., 1995; Browell et al., 1996; Connors et al., 1996; Talbot et al., 1996; Thompson et al., 1996; Jonquilrese et al., 1998; Novelli et al., 1998; Blake et al., 1999; Gregory et al., 1999; Singh et al., 2000]. Los aerosoles del humo perturban la radiación regional y probablemente mundial, por sus efectos de dispersión de luz y su influencia en procesos de microfísica de nubes [Crutzen y Andreae, 1990; Penner et al., 1992; Andreae, 1995].

La publicidad de grandes catástrofes por incendios en los últimos años y esfuerzos científicos intensivos durante la última década, el público en general, así como la comunidad científica ahora son conscientes de que las emisiones de la quema de biomasa representan una gran perturbación a la química atmosférica global, especialmente en los trópicos (Andreae & Metlet, 2001).

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por incendios forestales se han relacionado con el efecto invernadero y el calentamiento global, aunque la quema de combustibles fósiles es el mayor responsable del incremento de las emisiones a la atmósfera, las emisiones causadas por los incendios forestales suponen también un elemento a tener en cuenta en este proceso, convirtiéndose ~~por ello~~ en uno de los problemas que atrae la atención de la comunidad científica internacional. (YAMALLEL & otros, 2013)

Aparejado al desarrollo de las observaciones satelitales enfocado al monitoreo y descripción de los incendios se han desarrollado modelos biogeoquímicos para combinar observaciones satelitales con las estimaciones de consumo de combustible que responden a los ecosistemas de la tierra y la sabana y validación de los valores modelados en varios otros biomas. Nuevas mediciones del factor de emisión y una evaluación más sistemática de la información disponible ha llevado a

un conjunto más coherente de emisión que ~~mejor~~ resuelven biomas de bosques extratropicales (Akagi et al., 2011).

Unificando los elementos adecuados para calcular las emisiones siguiendo el paradigma Seiler y Crutzen (1980) presentan mejoras sustanciales. Por lo tanto, nuestras estimaciones de las emisiones son más fiables al basarse en información actualizada sobre los componentes clave de la ecuación de las emisiones de incendios, pero las incertidumbres siguen siendo un factor crítico que debe atenderse ya que son difíciles de cuantificar (van der Werf & otros, 2017).

Estos aspectos han sido tomados como antecedentes teóricos y bases justificativas de esta investigación. Además de los trabajos realizados por Bautista Vicente en la caracterización y cuantificación de los incendios forestales y sus emisiones de CO₂ en el territorio Mexicano (Bautista Vicente, 2015). Del análisis de Bautista se deriva que la Península de Yucatán es de las regiones con mayor frecuencia de incendios al año, así como de mayor emisión de gases efecto invernadero.

En su modelación de emisión de CO₂ para el territorio mexicano concluía que la celda de mayor emisión se daba, precisamente en la Península de Yucatán, específicamente hacia el interior del estado Campeche. Estos elementos fueron tomados como puntos de partida para estudiar con mayor detalle el comportamiento de los incendios y las emisiones en la región peninsular.

La mayor problemática que enfrentó Bautista en sus investigaciones sobre incendios forestales y emisión de gases fue determinar el tamaño de incendios. La metodología aplicada por esta autora aunque resolvió su problema no fue de mucha precisión. De ahí la necesidad continuar esta línea de investigación para determinar el tamaño de los incendios y analizar su comportamiento en la zona de mayor frecuencia de incendios y emisiones de gases asociados a estos.

CAPITULO 1: ASPECTOS TEÓRICOS METODOLÓGICOS

La quema de biomasa contribuye de manera importante a la contaminación del aire con partículas y gases tóxicos y de efecto invernadero en todo el mundo. En muchos casos, esto resulta en una exposición humana a altos niveles de diversos contaminantes del aire, pero a diferencia de algunas fuentes producidas por el hombre, dicha quema no está del todo cuantificada. La naturaleza de la quema de biomasa es tal que la combustión no se completa y, como resultado, se emite un gran número de contaminantes. Los contaminantes del aire (o sus precursores) que a menudo tienen mayor conexión con las exposiciones de la población en general son el material particulado (MP), los óxidos de nitrógeno (NO_x), el dióxido de azufre (SO₂), y el monóxido de carbono (CO). Por ejemplo, las emisiones de compuestos basados en azufre y nitrógeno dependen de la eficiencia del proceso de combustión y, la composición química de la vegetación quemada.

En México, cada año es común escuchar de las fuentes responsables de los incendios forestales como la CONAFOR y otras, que el número de incendios asciende con respecto a años anteriores (*...los incendios forestales que han afectado el territorio mexicano este año (2017) aumentaron en comparación con el mismo periodo del anterior, informó la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR)...*). Es un hecho que las regiones tropicales están expuestas cada año a regímenes de altas temperaturas y periodos de bajas lluvias que favorecen la formación de incendios ya sean de forma natural o provocada.

Tales incendios han devenido en serios problemas ambientales por la emisión de gases y partículas a la atmosfera. Estas emisiones intervienen en los procesos de circulación atmosférica, aprovechándolos como transporte para llegar hasta poblaciones y cultivos. De ahí que se haya convertido en un tema de interés para muchos autores y disciplinas por las variadas aristas investigativas que lo envuelven.

Una de estas aristas es la cuantificación de las áreas quemadas por un incendio forestal. Este dato es de mucha utilidad para la estimación de la cantidad de gases y aerosoles emitidos por un incendio forestal. Sin embargo es algo complicado su

cálculo. Cuando el incendio es de grandes dimensiones y asistido por equipo especializado de la CONAFOR y otros es posible su cuantificación en superficie afectada. ¿Qué sucede cuando el incendio no es de esta envergadura o aparentemente pasa desapercibido? ¿Cómo estimar esa área afectada si no hay presencia física de especialistas para medir el impacto del fuego? ¿Qué pasa con esas pequeñas áreas que parecen insignificantes, pero que sumadas llegan a ser similares a un gran incendio?

Poder medir el tamaño de un incendio es la principal problemática de esta investigación. Este capítulo sienta las bases teóricas y metodológicas relacionadas con la temática de la quema de biomasa, incendios y estimaciones.

1.1. Incendios forestales. Generalidades

Se considera como incendio forestal a la propagación libre del fuego sobre la vegetación en los bosques, selvas y zonas áridas y semiáridas. Para que se produzca se necesita una fuente de calor como la radiación solar, su desarrollo depende del oxígeno que se encuentra disponible en la atmosfera y del combustible que proviene de la vegetación forestal disponible (González, 1998, López, 2009).

Para la CONAFOR, de forma similar a González 1998, un incendio forestal se concibe como la propagación libre y no dispuesta del fuego sobre las superficies forestales, tales como: bosques, selvas, pastizal, matorral, entre otras. Esta comisión nacional considera tres tipos fundamentales de incendios forestales:

Incendios Superficiales: 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, humus, entre otros.

Incendio Subterráneo: Cuando un incendio superficial se propaga bajo el suelo. En este caso llega a quemarse la materia orgánica acumulada y las raíces, e incluso puede alcanzar los afloramientos rocosos. Generalmente éstos no producen llamas y emiten poco humo.

Incendios de Copa o Aéreos: las llamas alcanzan las copas de los árboles, son los más destructivos, peligrosos y difíciles de controlar debido a que el fuego consume toda la vegetación. También comienzan en forma superficial, pero en este caso, 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.

La quema de vegetación aunque en ocasiones parezca provechosa deja tras de sí muchos procesos ambientales desencadenantes de problemas. Cuanto más grandes es el incendio tanto más grande es el problema ambiental que genera. Los incendios forestales han contribuido en todo el mundo al deterioro de los recursos naturales y a pérdidas económicas (directas o indirectas) y de vidas humanas. En México, esta situación no es la excepción; de acuerdo con las condiciones climáticas y meteorológicas, cada año se presentan incendios forestales de diversas magnitudes. De 1970 a la fecha han ocurrido, en promedio, unos 7 000 incendios forestales por año, afectándose en promedio unas 221 179 hectáreas (Ressl & Cruz, 2011).

Causas principales (CONAFOR)

Accidentales: Rupturas de líneas eléctricas, accidentes automovilísticos, ferroviarios y aéreos.

Negligencias: Quemas agropecuarias no controladas, fogatas de excursionistas, fumadores, quema de basura, limpieza de vías en carreteras y uso del fuego en otras actividades productivas dentro de áreas forestales.

Intencionales: Quemadas por conflictos entre personas o comunidades, tala ilegal o litigios.

Naturales: Caída de rayos o erupciones volcánicas.

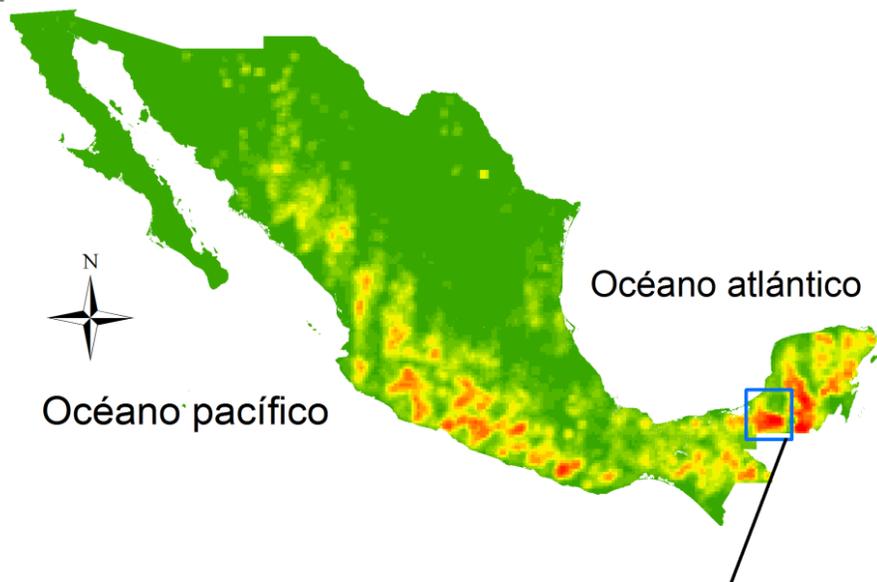
Las causas de los incendios forestales en México son atribuibles principalmente a las actividades humanas (98% del total nacional) y el resto se debe a causas naturales derivadas de fenómenos como descargas eléctricas o erupción de volcanes. Se calcula que las actividades agropecuarias representan 41% de las

causas que originan los incendios forestales; le siguen las causas desconocidas, con 13%, fumadores con 12%, fogatas 11%, y el resto 13% (Ressl & Cruz, 2011).

Es necesario destacar que la CONAFOR no considera incendio aquel que sea realizado por actividades humanas como agrícolas o silvícolas siempre que ocurra de forma controlada. Es decir que aquellas áreas de pequeños agricultores que son quemadas para eliminar malezas, desechos de cosechas o expansión de tierras cultivables no aparecen registradas en los inventarios anuales ni reportados como incendios.

En 1999, la CONABIO implementó un sistema para la detección de puntos de calor (como indicador de posibles incendios forestales) utilizando imágenes diurnas y nocturnas del sensor avhrr (Advanced Very High Resolution Radiometer) a bordo de los satélites de la serie NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), que se reciben gratuitamente y en tiempo real en la estación de recepción satelital de la CONABIO. En 2001, se incorporó, para la detección de puntos de calor, los sensores Modis (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), a bordo de los satélites Aqua y Terra de la NASA, que se comienzan a recibir desde la estación de recepción, aumentando ocho pasos diarios de imágenes diurnas y nocturnas, y se mejoró el algoritmo de detección de puntos de calor, en comparación con las dos observaciones que se realizaban con las imágenes AVHRR (Ressl & Cruz, 2011).

Del análisis realizado al conjunto de datos de incendios forestal (puntos de calor CONABIO) y, a los datos digital del territorio Mexicano, se estimó la frecuencia de incendios forestales... 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 en la región sur de la península de Yucatán (Bautista Vicente, 2015).



Región con Número Máximo de Incendios Forestales

Figura 1: Frecuencias de incendios forestales en México 1999.2010. Tomado de Bautista Vicente, 2015.

La quema de biomasa no sólo favorece la pérdida de hábitat y biodiversidad, sino además la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), particularmente el dióxido de carbono (CO₂), que favorece el calentamiento global (Whelan, 1995, Flores y Gómez, 2009, Csiszar et al., 2009). Las afectaciones por las emisiones de GEI se expresan a nivel local, regional y global, por lo que se convierte en un tema de relevancia nacional e internacional (Cruz López, 2018).

Otros efectos derivados de los incendios forestales son el incremento de las deposiciones ácidas y las alteraciones en los ciclos de nutrientes debido a que cantidades importantes del nitrógeno presentes en las áreas afectadas se volatiliza. Estas alteraciones en el clima pueden afectar también al ciclo hidrológico al

reducirse las precipitaciones en las áreas deforestadas y favorecerse la escorrentía (González, 1998).

1.2. Detección de áreas quemadas

Detrás de un incendio forestal el primer interés es conocer el área afectada. Tras esta información se derivan un grupo de datos importantes como envergadura del incendio, magnitud, daños, afectaciones, etc. sin embargo conocer este dato no es tarea sencilla. Si el incendio es grande y llegan hasta él personal de alguno de los grupos encargados de enfrentar este tipo de eventos es relativamente fácil cuantificar el área afectada. Un grupo considerable de incendios ya sea por su tamaño o su condición de controlados no son medidos por la comisión de tales daños y la información se pierde, pero el daño y la emisión de gases se quedan.

Obviamente la vía más sencilla será visitar el lugar del incendio, una vez ocurrido éste, y con instrumentos de medición espacial cuantificar el área quemada. No obstante es una vía consumidora de recursos, tiempo y complicada en lugares de acceso difícil. Una de las vías para obtener el tamaño de un incendio ha devenido en la utilización de imágenes satelitales a partir de la firma espectral dejada por la vegetación quemada. Aunque está limitada a la resolución espacial y temporal de estas imágenes es una forma que arroja buenos resultados en la estimación de dichas áreas.

Una buena parte de las propuestas metodológicas que se pueden encontrar en la literatura, como estudios realizados por Trigg y Flasse (2000) y Martín y et al. (2005) entre otros, plantean la necesidad de llevar a cabo determinadas transformaciones de los datos espectrales originales con el fin de mejorar la capacidad de discriminación de las áreas quemadas, las más utilizadas de las cuales son los índices espectrales. El objetivo de estos índices es realzar las diferencias espectrales de las zonas quemadas respecto a otras cubiertas, sobre todo cuando el análisis se realiza sobre imágenes post-incendio (Gómez y Martín, 2008). Los índices tienen como principal ventaja la reducción de los errores de comisión, es decir, las zonas clasificadas como quemadas cuando en realidad no lo son. En este ámbito algunos de los índices más utilizados en los últimos años y que han ofrecido

buenos resultados han sido el NBR (Normalized Burnt Ratio) según Key y Benson (1999), el BAI (Burn Area Index) según Martín (1998) y el MIRBI (Mid-Infrared Bispectral Index) según Trigg y Flasse (2000). (Opazo y Chuvienco, 2009) tomado de (García, 2013).

Las estimaciones cuantitativas de la zona quemada son necesarias para hacer frente a muchos retos de ciencias ecológicas y de la tierra, incluida la comprensión de los cambios impulsados por la perturbación en el funcionamiento de los ecosistemas y los flujos de carbono [Luo y Weng, 2011], los impactos del uso de la tierra sobre la química atmosférica y la salud humana [Johnston et al., 2012], y la fortaleza de las retroalimentaciones del ciclo del carbono al clima durante el siglo XXI [por ejemplo, Golding y Betts, 2008; Kloster et al., 2012]. A escala global, Productos de área quemada se generan mediante algoritmos de detección de cambio, aplicado a las series de tiempo, de la reflectancia superficial de espectrómetros de resolución moderada, normalmente a 500 m a 1 km de resolución y requieren calibración y validación con imágenes de mayor resolución [Roy et al., 1999; Stroppiana et al., 2003; Silva et al., 2003; Tansey et al., 2004; Simon et al., 2004; Roy et al., 2005; Loboda et al., 2007; Tansey et al., 2008; Giglio et al., 2009; Roy y Boschetti, 2009]. (Randerson & otros, 2012).

El conocimiento acumulado de las ciencias atmosféricas es de mucha utilidad para las estimaciones de gases y aerosoles emitidos por los incendios forestales. El uso de imágenes satelitales, con el fin de cuantificar áreas quemadas, es una de las mejores herramientas cuando no se puede acceder al sitio del incendio o este ocurrió en tiempo pasado.

1.3. Emisión de gases y aerosoles

La atmósfera está siendo invadida constantemente por gases y partículas provenientes de la superficie terrestre. Muchos, necesarios para procesos claves de la atmósfera y otros solo invasivos que reaccionan a la presencia de la radiación solar para transformarse en verdaderos contaminantes. La actividad del hombre, en todas sus manifestaciones, es generadora de gases y partículas, como desechos de sus procesos productivos, fundamentalmente. La naturaleza también

se encarga de aportar elementos a esta invasión gaseosa de la atmósfera provenientes de todos sus procesos transformadores ya sean de índole geológicos como propiamente atmosféricos.

En la década de los 90'S, se ha vuelto cada vez más evidente que la composición de gases traza de la atmósfera está cambiando con el tiempo. Estos cambios incluyen la acumulación atmosférica de gases efecto invernadero (dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, los clorofluorocarbonos y el ozono troposférico), que puede llevar a un calentamiento global y la destrucción química y agotamiento del ozono estratosférico. Además, la concentración troposférica de óxido nítrico y monóxido de carbono químicamente activo también está aumentando con el tiempo, así como la precipitación ácida. Estos cambios en la composición de gases traza de la atmósfera y sus consecuencias ambientales se han convertido en áreas de gran preocupación nacional e internacional (Levine, 1990).

La quema de biomasa contribuye de manera importante a la contaminación del aire con partículas y gases tóxicos y de efecto invernadero en todo el mundo. En muchos casos, esto resulta en una exposición humana a altos niveles de diversos contaminantes del aire, pero a diferencia de algunas fuentes producidas por el hombre, dicha quema está mal cuantificada. La naturaleza de la quema de biomasa es tal que la combustión no se completa y, como resultado, se emite un gran número de contaminantes. Durante el período 1997-2016, las emisiones de Carbono por incendios, según GFED4s fueron en promedio 2,2 Pg/años con variabilidad interanual considerable (van der Werf & otros, 2017).

Aproximadamente el 84% de las emisiones globales de carbono tienen un origen en los trópicos entre 23.5° N y 23.5° S (1830 Tg C yr⁻¹), y el 62% de las sabanas tropicales (1341 Tg C yr⁻¹), subrayando la importancia del fuego como un conductor de los ciclos biogeoquímicos y los procesos eco-sistémicos de los trópicos (van der Werf & otros, 2017).

Estas estimaciones indican que la quema de biomasa es una importante fuente global de CO₂ (40% de todas las fuentes mundiales), O₃ (38%), CO (32%), H₂ (25%),

NMHC (24%), CH₃Cl (22%), NO_x (21%) y carbono orgánico particulado (39%) (Levine, 1990).

La quema de residuos de cosecha tiene entre sus resultados las emisiones de partículas (PM) (Andreae y Merlet, 2001; Reddy y Venkataraman, 2002), aparecen con una gran fracción carbonosa (Liousse et al., 1996; Gire et al., 1997) e iones inorgánicos solubles en agua (Rau, 1989). Los dos tipos de aerosol carbonosos son carbono orgánico (OC), que principalmente dispersa radiación y refresca la atmósfera (forzamiento directo) y el elemento carbono (CE), que absorbe la radiación solar y genera calentamiento de la atmósfera (Liousse et al., 1996; IPCC, 2001; Menon et al., 2002). Los iones inorgánicos solubles en agua (por ejemplo, potasio, sodio, cloruro y calcio) y compuestos orgánicos higroscópicos en partículas de combustión de residuos de cultivo actuarían como núcleos de condensación (CCN), llevando a una reducción neta de radiación solar recibida en la nube y la superficie de la tierra (forzamiento indirecto) (Penner et al., 1992). La combustión de residuos de cosecha también resulta en emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono (CO₂), la principal fuerza impulsora para el cambio climático pasado (Zhang et al., 2000; IPCC, 2001; Andreae y Merlet, 2001) tomado de (Guoliang & otros, 2008).

1.4. Metodología

Las emisiones de gases y partículas procedentes de la quema de biomasa se obtienen por métodos de estimación, fundamentalmente. Estas estimaciones se basan en factores de emisión (FE) ya preestablecidos y obtenidos mediante el trabajo combinado de laboratorio y campo. De esta forma se ha estudiado la fracción de biomasa que se quema y los gases que se emiten según tipo de vegetación y extensión superficial. Es decir, conociendo la superficie y el tipo de vegetación quemadas con el FE correspondientes es muy sencillo estimar las emisiones.

El aspecto fundamental para que la estimación mejore en precisión es estimar lo más cercano posible a la realidad el tamaño de los incendios. Este es precisamente el problema de investigación en este trabajo. La mayoría de las investigaciones realizadas en el país, relacionadas a esta temática, han utilizado como tamaño del

incendio la media de la superficie quemada por incendio. Un valor que ha mostrado resultados satisfactorios pero disminuyendo considerablemente su precisión.

En este trabajo se utilizó imágenes satelitales y técnicas geomáticas para la estimación del tamaño de los incendios. Existen varias metodologías a nivel internacional que se apoyan en imágenes de satélites para obtener áreas quemadas, pero la mayoría de los algoritmos están basados en imágenes MODIS. Estas imágenes no son de alta resolución espacial, más si de alta resolución temporal. Este aspecto hace que las estimaciones puedan ser subestimadas. Es por ello que se utilizó imágenes LANDSAT 8 y 7 para mejorar la resolución espacial a 30 m.

La metodología general para esta investigación se muestra en la figura 2. Para estimar emisión de gases y aerosoles, utilizando imágenes satelitales, es necesario detectar puntos de calor, superficie quemada y tipo de vegetación. Los puntos de calor se tomaron de CONABIO que tiene una metodología de detección de puntos de calor, diarios, y eliminación de falsos puntos. El tipo de vegetación se obtuvo de la capa de vegetación y uso del suelo actualizado en diciembre de 2016, por parte del INEGI. Mientras que en la figura 3 se muestra la metodología seguida para la estimación de las áreas quemadas.

El procedimiento seguido para la estimación de las áreas quemadas es el siguiente. Se tomaron imágenes LANDSAT¹ 8 o 7 en dependencia de la disponibilidad de datos según fecha, lugar y contenido de nubosidad. El periodo analizado corresponde a la temporada de incendios del 2017, es decir los meses comprendidos entre febrero y mayo. La Península de Yucatán se cubre con nueve imágenes LANDSAT (Path (19-21) y Row (45-47)). De esta forma el periodo estudiado quedó conformado por un total de 54 imágenes de satélites, tomadas mes a mes e incluyendo el mes de enero como punto de partida. Se escogieron las imágenes con mínimo contenido de nubosidad.

¹ Tomadas del servicio geológico norteamericano en su sitio web <https://earthexplorer.usgs.gov/>



Figura 2: organigrama de investigación.

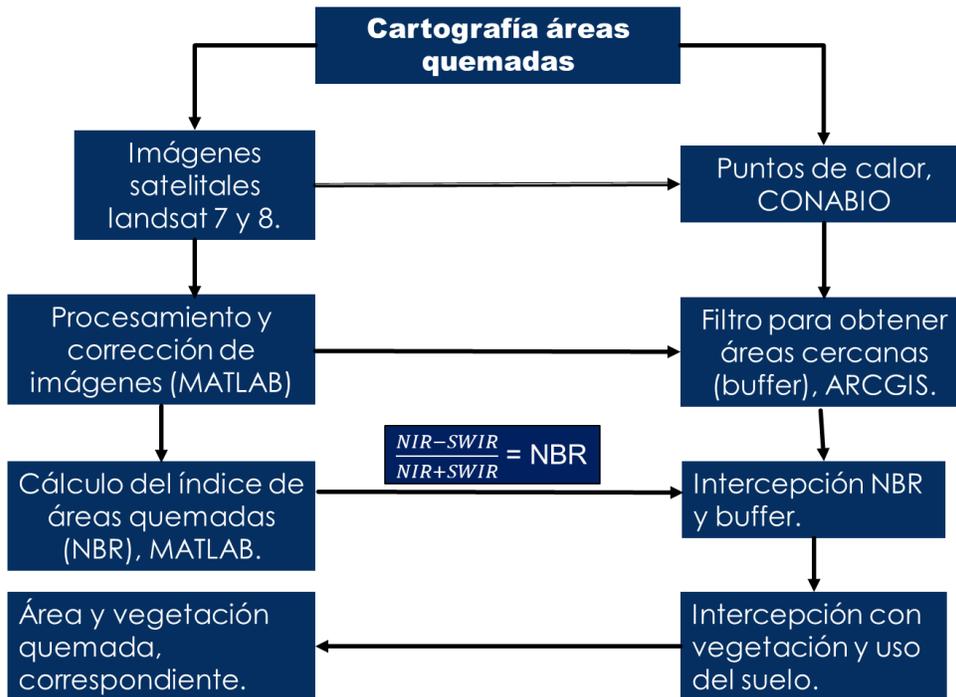


Figura 3: Organigrama de áreas quemadas.

Todas las imágenes fueron corregidas geométrica, radiométrica y atmosféricamente utilizando el software MATLAB en su versión R2017a. Los niveles digitales fueron

convertidos a valores de reflectancia. El comportamiento de las áreas quemadas (en una imagen satelital) se basa en las respuestas espectrales de los depósitos de ceniza y carbón, derivados de la quema de materia vegetal. El área quemada presentará un incremento en la reflectancia de la región visible (0.4 a 0.7 μm) en combinación de una disminución en el infrarojo cercano (NIR) (0.78 a 0.90 μm), incrementándose nuevamente en la región del infrarojo medio (SWIR) (1.3 a 8.0 μm) y térmico (8.0 a 14.0 μm). Basado en este principio se pueden encontrar varios índices en la literatura, algunos de ellos en la figura 4.

$$BAI = \frac{1}{(pc_{IRC} - \rho_{IRC})^2 + (pc_R - \rho_R)^2} \quad (1)$$

$$\frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} = NBR \quad (2)$$

$$BAIM = \frac{1}{(pc_{IRC} - \rho_{IRC})^2 + (pc_{SWIR} - \rho_{SWIR})^2} \quad (3)$$

$$MIRBI = 10LMIR - 9.8SMIR + 2 \quad (4)$$

$$\frac{SWIR1 - SWIR2}{SWIR1 + SWIR2} = NBR2 \quad (5)$$

Figura 4: Índices de áreas quemadas.

Los índices que no están resaltados aplican fundamentalmente para imágenes MODIS, VIIRS, etc. y tienen parámetros de ajustes específicos para tales imágenes por lo que no son aplicables a LANDSAT. El índice normalizado de áreas quemadas (NBR) y el normalizado de áreas quemadas 2 (NBR2) fueron los empleados en este trabajo. El análisis previo para la selección del índice se hizo a partir del cálculo de cada índice en una misma imagen donde se había identificado la ocurrencia de incendios. El que mejor resultados arrojó fue el NBR, al menos en el aspecto visible.

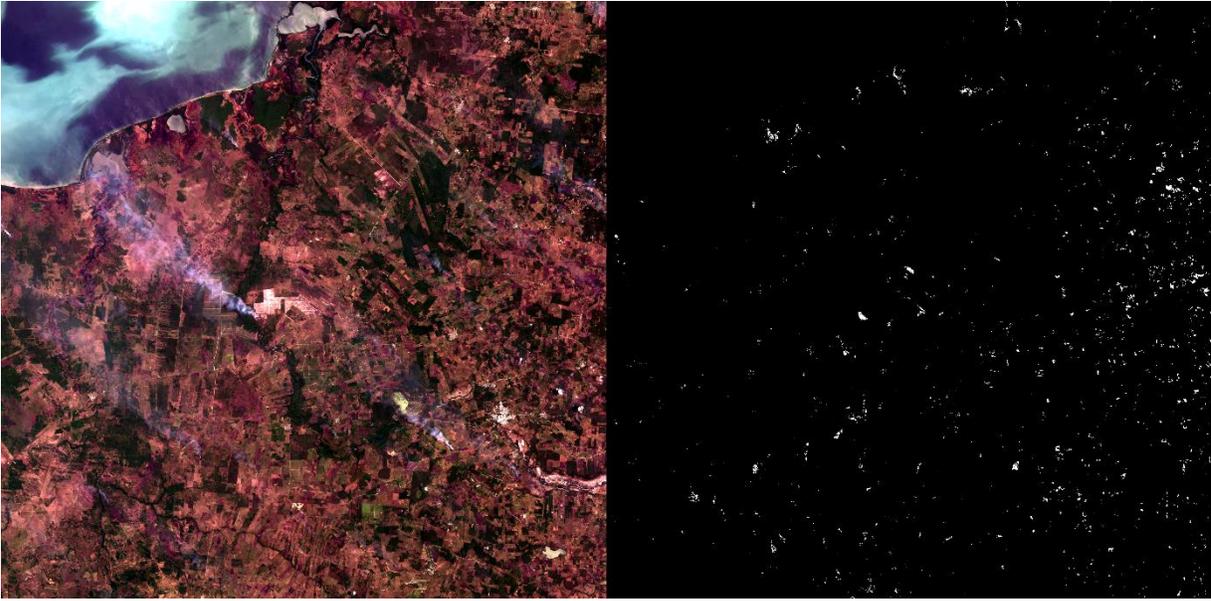


Figura 5: Índice normalizado de áreas quemadas (NBR), a la derecha, visible color real a la izquierda.

La figura 5 muestra el resultado de la aplicación del índice. Nótese la correspondencia entre las áreas de incendios, visiblemente a la izquierda, con las identificadas por el índice, a la derecha. Este índice fue ajustado estadísticamente a partir de una umbralización optimizada de acuerdo a la distribución de la reflectancia espacial y las diferencias de imágenes color real. Para ello se utilizaron los histogramas de reflectancia para zonas puntuales donde habían ocurrido incendios.

Los valores más bajos del índice se corresponden con las áreas quemadas. El umbral estará en dependencia de la imagen y el territorio analizado. En el caso de estudio los valores del índice que más se correspondieron con las áreas quemadas estaban en los negativos cercanos a cero.

Una vez obtenido el umbral y calculado el índice se exportó como una capa *shape* para ser filtrado en el software ArcGIS en su versión 10.5. Como filtros se utilizaron la capa *shape* de puntos de calor, obtenida de la CONABIO, y la capa *shape* vegetación y uso del suelo, obtenida de INEGI. A los puntos de calor se le aplicó un buffer de 500 m de radio para establecer la región probable de ocurrencia de incendios alrededor del punto. De esta forma al interceptar ambas capas, buffer de puntos de calor con NBR se obtienen las áreas realmente quemadas y se eliminan

aquellas áreas resultantes de los puntos de calor detectados por el NBR (ver figura 6).

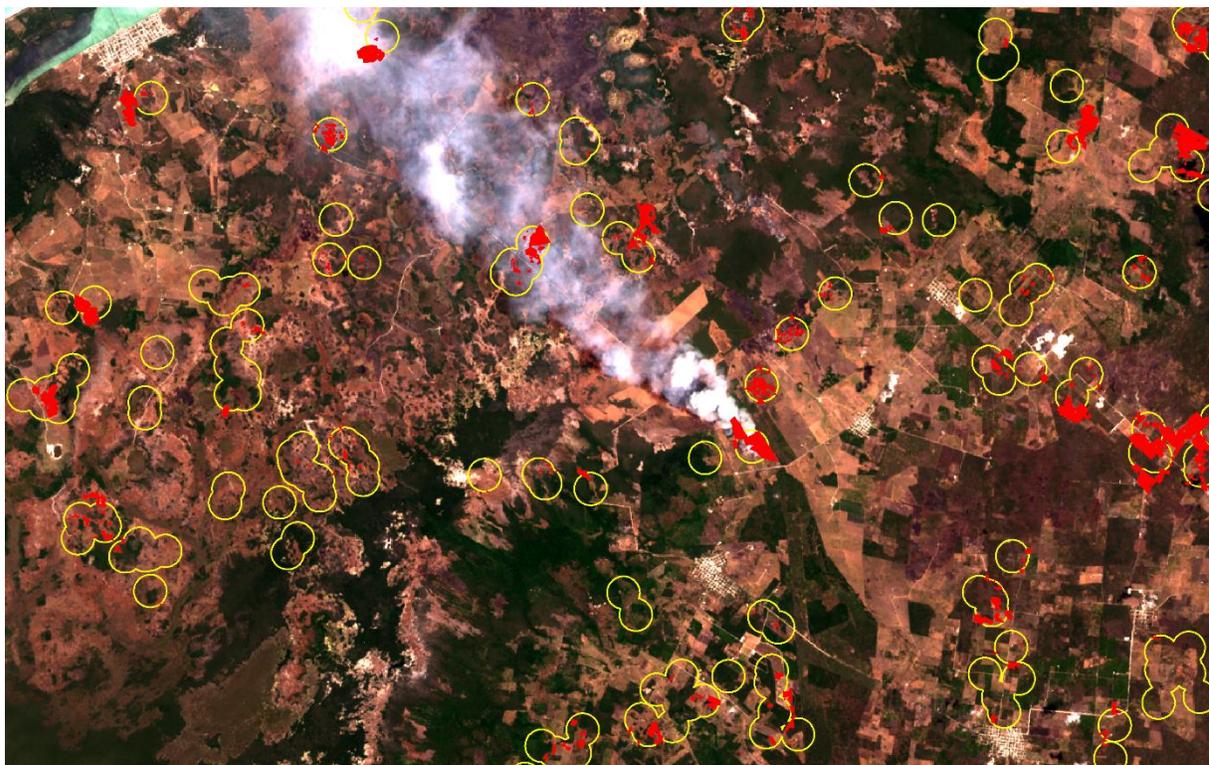


Figura 6: Intercepción de las capas NBR y Buffer de calor.

La imagen muestra el resultado de la intercepción del buffer con el NBR. Obsérvese como no todos los puntos de calor generan incendios. Los polígonos en rojo corresponden con las áreas quemadas y los anillos con la zona buffer de los puntos de calor. Este procedimiento se siguió para cada imagen de cada mes con el cuidado de que no se repitieran píxeles quemados de una imagen a otra. La acumulación de píxeles quemados de todas las imágenes por todos los meses llevó finalmente a la capa de áreas quemadas en la temporada de incendios 2017.

El otro filtro utilizado en el proceso fue mediante la capa de vegetación y uso del suelo. Al interceptar esta capa con la capa obtenida del paso anterior donde quedaron las áreas quemadas se obtuvo la vegetación por área quemada. A esta capa se le aplicaron filtros de localización para descartar aquellas que coincidían con usos inadecuados para vegetación como, agua, manglar, asentamientos

humanos, urbano, etc. El resultado final de este procedimiento deriva en las áreas y tipo de vegetación quemadas.

El paso final en este procedimiento fue la estimación de la biomasa quemada así como los gases y aerosoles emitidos durante toda la temporada. Ambos aspectos se estimaron utilizando los FE publicados por la Unión Europea de Geofísica para la estimación de gases por biomasa quemada usada en los modelos atmosféricos.

Table 1: Biomass loading, combustion factor, and biomass consumption estimates for various fuel types. Taken from S. K. Akagi et al.: Emission factors for open and domestic biomass burning.

Fuel Type	Reference	Location	Biomass Loading (Mg ha ⁻¹)	Combustion Factor (%)	Biomass Consumption (Mg ha ⁻¹)
Tropical Dry Forest	Kauffman et al. (2003)	Mexico	118.2–134.9	62.4–80.2	73.7–108.1
	Kauffman et al. (1993)	Brazil	73.8	87	64
	Jaramillo et al. (2003)	Mexico	112.2	–	–
	Shea et al. (1996)	Zambia	5.1–5.8	88–74	4.5–4.3
	Hoffa et al. (1999)	Zambia	10.4	22.3	2.30
	Ward et al. (1992)	Brazil	9.3	78	7.3
	van der Werf et al. (2010), GFED3	Central America	–	–	29.8
Evergreen Tropical Forest	Ward et al. (1992)	Brazil	292.4	53	155
	Fearnside et al. (1993)	Brazil	265	27.5	73
	Carvalho Jr. et al. (1998)	Brazil	401.5	20.47	82
	Carvalho Jr. et al. (2001)	Brazil	496	50	248
	Hughes et al. (2000)	Mexico	403	95	380
	Kauffman et al. (1995)	Brazil	355.4	51.6	185
	Guild et al. (1998)	Brazil	354.8	47	167
van der Werf et al. (2010), GFED3	Equatorial Asia	–	–	190	
Crop Residue	Zarate et al. (2005)	Spain	–	80	1.14
	Hughes et al. (2000)	Mexico	23	–	–
	Lara et al. (2005)	Brazil	–	–	20
Peatland	Page et al. (2002)	Indonesia	–	–	510
	Ballhorn et al. (2009)	Indonesia	–	–	383
Pasture	Hughes et al. (2000)	Mexico	24	–	–
	Guild et al. (1998)	Brazil	66.3	31	21
	Kauffman et al. (1998)	Brazil	53–119	21–84	24.5–44.5
	Kauffman et al. (2003)	Mexico	29.0–40.3	75–63	21.8–25.4
	Jaramillo et al. (2003)	Mexico	26.9	–	–
Savanna	Ward et al. (1992)	Brazil	7.2	99	7.1
	Savadogo et al. (2007)	West Africa	–	–	4.1
	Shea et al. (1996)	South Africa	3.8	76	2.9

La tabla 1 muestra los valores utilizados para la estimación de la biomasa quemada según el tipo de vegetación y las hectáreas afectadas. El bosque tropical seco también es conocido como selva baja caducifolia así como el bosque tropical siempre verde es conocido como selva alta o bosque tropical perennifolio. Términos estos más utilizados en la clasificación de vegetación usada por INEGI. La biomasa está dada en Mg/Ha, el factor de combustión en el porcentaje que se quema de la

carga de biomasa que tiene una hectárea de vegetación quemada. Basta con multiplicar el consumo de biomasa por el total de hectáreas del tipo de vegetación correspondiente para estimar la cantidad de biomasa quemada.

De la misma forma se hizo la estimación de los gases y aerosoles. Utilizando los FE que aparecen en la tabla 2 se hizo el cálculo para los principales gases de efecto invernadero y trazas contaminantes.

Table 2: Emission factors (g kg⁻¹) for species emitted from different types of biomass burning. Taken from S. K. Akagi et al.: Emission factors for open and domestic biomass burning.

	Tropical Forest	Savanna	Crop Residue	Pasture Maintenance
Carbon Dioxide (CO ₂)	1643 (58)	1686 (38)	1585 (100)	1548 (142)
Carbon Monoxide (CO)	93 (27)	63 (17)	102 (33)	135 (38)
Methane (CH ₄)	5.07 (1.98)	1.94 (0.85)	5.82 (3.56)	8.71 (4.97)
Sulfur Dioxide (SO ₂)	0.40 (0.19)	0.48 (0.27)	-	0.32 (0.14)
Nitrogen Oxides (NO _x as NO)	2.55 (1.40)	3.9 (0.80)	3.11 (1.57)	0.75 (0.59)
PM _{2.5}	9.1 (3.5)	7.17 (3.42)	6.26 (2.36)	14.8 (6.7)
PM ₁₀	18.5 (4.1)	-	-	28.9 (13.0)

Finalmente y aplicando el procedimiento anteriormente descrito se llega a obtener las áreas quemadas, el tipo de vegetación afectada, la cantidad de vegetación por unidad de área así como la biomasa quemada y gases emitidos productos de los incendios forestales en la región estudiada.

Esta metodología es aplicable a cualquier región siempre y cuando se disponga de imágenes satelitales con mínimo contenido de nubosidad y un par de imágenes por escena para garantizar el momento antes y después de la quema de biomasa. Por otra parte, mejora el nivel de precisión en la obtención del tamaño del incendio.

CAPITULO 2: CARACTERIZACION GENERAL DEL TERRITORIO

2.1. Ubicación geográfica



Figura 7: Ubicación geográfica, Península Yucatán (imagen tomada de internet)

La península de Yucatán es la porción septentrional de Mesoamérica, que divide el golfo de México del mar Caribe en el extremo sureste de América del Norte y la parte norte de América Central, con un territorio de aproximadamente 125 000 km². La integran al norte, los estados mexicanos de Yucatán, Quintana Roo y Campeche, y al sur la conforman Belice y el norte de Guatemala (el Petén). Las demarcaciones limítrofes peninsulares

son: al suroeste, la laguna de Términos en el estado de Campeche; al noroeste la ría de Celestún y el puerto de Sisal en el estado de Yucatán; al noreste, Cabo Catoche en el estado de Quintana Roo; al sur, el cinturón plegado del departamento del Petén, Guatemala; al sureste, bordeando las montañas Maya, el litoral del golfo de Honduras (ver Figura 1) (WIKIPEDIA, 2018). Para fines de este trabajo se analizó la parte peninsular correspondiente a la República Mexicana, es decir los estados de Yucatán, Quintana Roo y Campeche.

2.2 Características físico-geográficas

Los rasgos principales de la geografía de un territorio son claves para la comprensión de cualquier fenómeno espacial. Los incendios forestales, como fenómenos espaciales, están asociados fuertemente a características climáticas, meteorológicas, edáficas, geomorfológicas, bióticas, humanas, etc. A continuación se presenta una breve caracterización físico-geográfica y socioeconómica de la península de Yucatán.

2.2.1. Geología y Relieve

La región estudiada, situada al extremo oriental de la república mexicana, consiste desde el punto de vista geológico, en una plataforma con potentes estratos, principalmente de rocas carbonatadas (figura 8). Se trata de una provincia fisiogeográfica con topografía de poco contraste en altitud, resultando así singular dentro del contexto nacional².

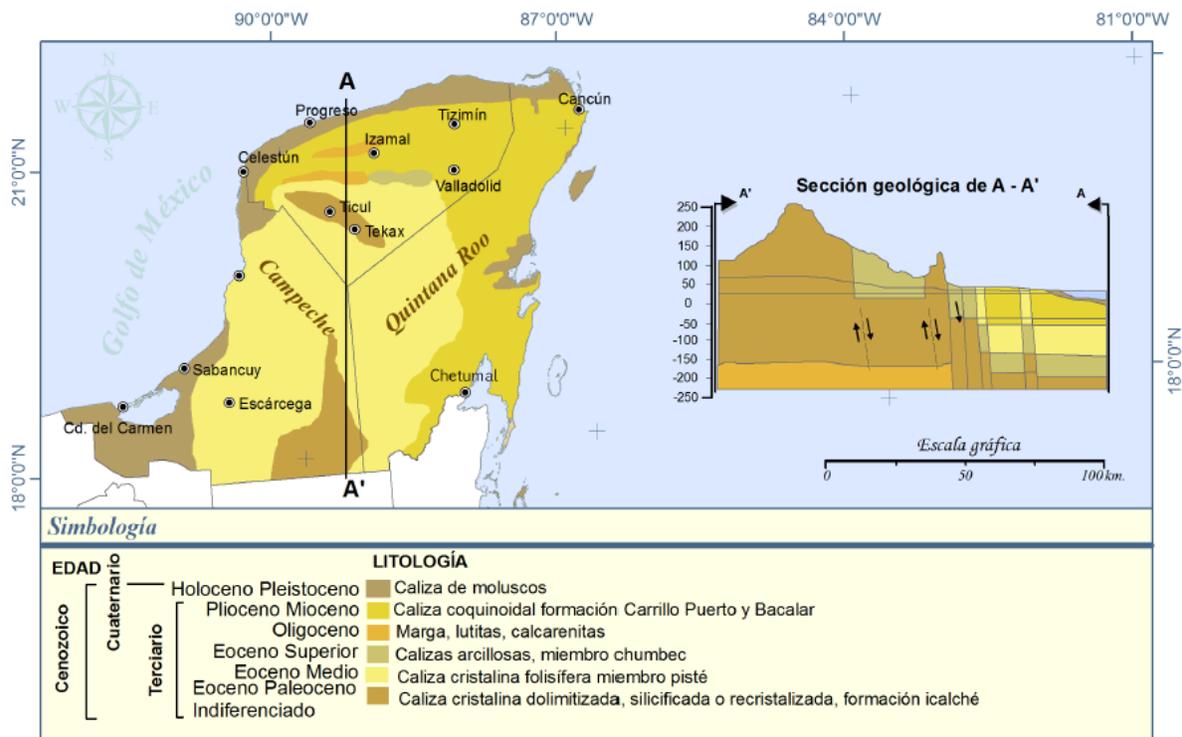


Figura 8: Clasificación geológica de la Península Yucatán (SEDUMA, Yucatán).

La actividad tectónica vuelve evidente la constitución geológica de la península. Las rocas sedimentarias marinas terciarias atestiguan un levantamiento gradual, por lo menos desde el Oligoceno. La porción septentrional es una superficie nivelada de poca altitud, elevada seguramente en el cuaternario, por lo que ha estado sujeta a movimientos de transgresiones y regresiones marinas.

² Tomado de: Lugo Hubp, J., Aceves Quesada, J., & Espinasa Pereña, R. (1992). Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán. revista del Instituto de Geología, UNAM., 10(2), 143-150. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2231919.pdf>

La evolución del relieve está asociado a la neo-tectónica y glaciaciones, formando en gran parte Karts. Es pobre en montañas a diferencia del resto del país.

La península de Yucatán muestra dos unidades morfológicas principales: la primera, ubicada en el norte donde predominan las planicies y las rocas sedimentarias geogénicas. En el sur las planicies alternan con lomeríos de hasta 400 msnm en rocas sedimentarias oligocenas. Esta configuración expresa un levantamiento a partir del mioceno en la porción meridional.

El levantamiento de mayor duración en la parte meridional está afectado en mayor grado por una erosión diferencial que origina un relieve de lomas y planicies. Mientras que en el norte se produce un relieve muy joven de planicies basculadas y por su constitución de rocas muy resistentes, una disección en el subsuelo controlada por la fractura de rocas, resultando un sistema completo de formas kársticas.

Dos zonas de altitud, una correspondiente a la porción septentrional, con menos de 50 msnm y otra meridional de hasta 400 m. en esta última se aprecia un aumento gradual de la altitud de norte a sur en una clara alineación.

Las porciones más bajas y planas son las más jóvenes, mientras las más antiguas corresponden a las más elevadas y de mayor contraste en altitud. Estrecha planicie de acumulación marina domina la región del norte noroeste de la península. La planicie nororiental con altitud de 10 – 50 m, tiene relieve de amplio desarrollo kárstico. Se hace referencia a dolinas por disolución de rocas que alcanzan hasta 100 m de diámetro y 30 m de profundidad.

La porción oriental, desde el nivel del mar hasta los 50 m, consiste en varios pisos de altitud diferentes controlados por fallas. Dominan las cuencas alargadas, sin desagüe superficial. Grandes depresiones con bordes escarpados ocupadas por lagos salobres.

Por las características geomorfológicas de la península se esperaría que los incendios forestales no sean de amplia propagación, pues la pendiente (>30%), la ladera (solana) y los valles (estrechos) aumentan el riesgo de incendios y con ellos

la propagación de los mismos. Sin embargo la región es prácticamente llana lo que favorece el control de los incendios.

2.2.3 Clima e Hidrología

La posición geográfica de la Península de Yucatán, con tres de sus flancos rodeados por mares, así como su relativa cercanía al Trópico de cáncer, a la Celda Anticiclónica Bermuda Azores y la ausencia de orografía considerable hace que la región tenga un clima particular. La península está regida por un gradiente de precipitación que ocasiona que la parte norte sea la más seca, ocupada principalmente por el estado de Yucatán.

El clima peninsular está formado por la interacción de los factores climáticos que inciden sobre la región y que se relacionan a continuación (*Orellana et al, 2003*):

Corrientes marinas: todos los ramales de las corrientes marítimas que bordean la Península de Yucatán son derivados de la corriente Ecuatorial Norte del Atlántico, formando la corriente del Caribe que deriva en la del canal de Yucatán y a su vez en la corriente del Golfo de México. Se trata de corrientes cálidas que influyen de modo importante en los vientos cálidos húmedos o secos.

Circulación del este o *vientos alisios:* durante el verano, la península recibe estos vientos procedentes de la celda bermuda Azores, cargados de humedad y que depositan cada vez más precipitación conforme se adentran al interior de la península. La profundidad de estos vientos determinan los distintos regímenes de lluvia que prevalecen en la región.

Ondas tropicales: se producen en el cinturón de los vientos alisios. Son líneas de flujos onduladas superpuestas a los vientos del este. Apuntan la baja presión hacia el norte y tienen una dirección este-oeste. Como son un reforzamiento de los alisios, es muy posible constituyan los principales causantes de la lluvia durante el verano.

Depresiones o tormentas tropicales: se producen en el seno de las ondas tropicales. Constituyen zonas de baja presión temporal que se forman por el calentamiento del océano y pueden llegar a crecer hasta formar los huracanes en las diferentes

categorías. Estos disturbios causan lluvias en la región y sus vientos son causantes de la destrucción de biomasa.

Frentes fríos: nortes o masas de aire polar modificados se generan por el choque de los vientos circumpolares con los vientos del oeste provenientes de las anticiclones de latitudes medias. A veces ocasionan una bajada abrupta de temperatura con vientos fuertes y en ocasiones con lluvias de ligeras a muy fuertes, dependiendo de la saturación que hayan tenido en el golfo de México.

Estos factores unidos a la ubicación geográfica y la escasa altitud del estado determinan que el clima peninsular sea de los más cálidos en México. Las altas temperaturas, sumadas a la precipitación anual (con su mayor intensidad en verano), dan como resultado un dominio mayoritario del clima cálido subhúmedo con aproximadamente el 85% del territorio total del estado donde la temperatura media anual es de 24°C a 28 °C. Este régimen de temperaturas relativamente elevadas es atemperado por los vientos alisios que normalmente dominan en la región, producidos por un sistema isobárico que permite el flujo de viento de las zonas tropicales hacia el Ecuador (*ECURED*).

El clima semiseco muy cálido y cálido se distribuye en una franja prácticamente paralela a la costa, que va, aproximadamente, desde el oriente de Río Lagartos hasta Dzilam de Bravo, Hunucmá y Celestún; cubre una zona de alrededor del 13% del estado yucateco y teniendo una temperatura media anual que varía, por lo general, entre los 24 °C y 26 °C, aunque en algunas partes suele ser mayor a los 26 °C, y la precipitación total anual va de menos de 600 a 800 mm cúbicos (*ECURED*).

El clima seco muy cálido y cálido es predominante en la zona cercana al Golfo de México, y se expande por el este de Puerto Telchac hasta el oeste del puerto de Progreso con aproximadamente el 2% de la superficie del estado (*ECURED*).

Campeche por su parte presenta básicamente dos tipos de climas, de sabana tropical (Aw) y tropical del monzón (Am), según clasificación climática de Köppen.

Por su ubicación geográfica, los vientos (figura 9) predominantes en Yucatán oscilan entre el Este, Este-Noreste y Este-Sureste, debido a la diferencia de presión que existe entre el alta de Las Azores sobre el Atlántico Norte y la zona de convergencia intertropical sobre el Ecuador. Estos vientos contribuyen a la llegada de aire marítimo tropical, lo que explica lo húmedo y caluroso del clima, la mayor parte del año.

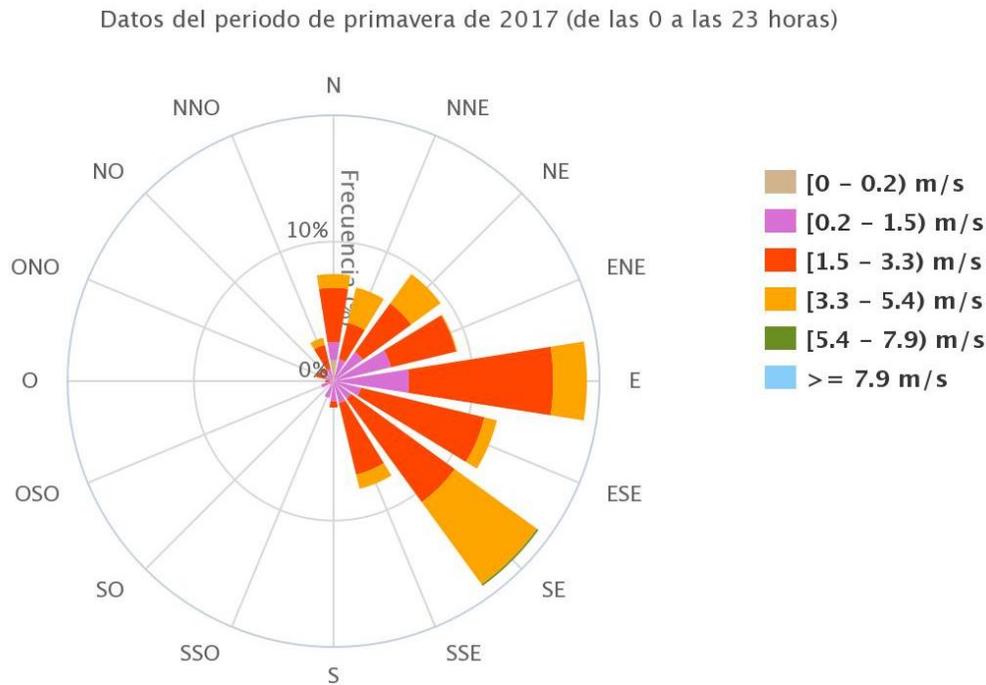


Figura 9: Rosa de vientos, interior Península Yucatán (SEDUMA, Yucatán).

No obstante, dependiendo de la época del año, hay algunos cambios en la dirección del viento. En el otoño e invierno principalmente, los vientos tienen un cambio de dirección transitoria y comienzan a llegar aire más frío desde los polos, que dan como resultado frente frío o “Norte”. Los “Nortes” se caracterizan por generar velocidades de viento fuerte que incluso llega a alcanzar hasta los 100 km/h. Por otro lado, está la llegada de vientos muy cálidos, generalmente en primavera, que son a los que se denominan “Suradas”. Las “Suradas”, como su nombre lo indica, son vientos muy cálidos que vienen desde el Sur y Sureste, los cuales hacen ascender de manera importante las temperaturas hasta superar los 40° C, que comúnmente ocurren en esta época del año.

Además de los vientos transitorios o estacionales que se establecen existe una escala de vientos todavía más regional y que se fabrican por las mismas características de la región. Estos vientos son llamados “Brisa” y se generan por la gran diferencia de temperatura que existe entre el continente y el océano, en este caso, el Golfo de México y el Mar Caribe.

Existe una considerable variabilidad espacial y temporal, con mayores valores de precipitación y anomalías en la costa, que van disminuyendo gradualmente hacia el Centro-Oeste del área en estudio. Durante este periodo hay una disminución de la precipitación anual y de la estación húmeda, en gran parte de la zona la cual alcanza una disminución de 12 mm anuales (estación Chachobben). Estaciones como Zoh Laguna Campeche muestran claramente un aumento en los años de sequía (desde leve hasta extrema) a partir de 1985 principalmente (Márdero S. N., 2012).

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen, la mayor parte de la península de Yucatán presenta un clima cálido sub-húmedo con temperatura promedio anual de 25.8 a 26.3° C y ocurrencia de lluvias en verano y otoño (junio-noviembre), con un gradiente de precipitación general de seco hacia el noroeste (600 mm) y más húmedo hacia el sureste (1 400 mm), clasificado como Aw (García, 1988; Strahler, 2008; Orellana et al., 2009). Las precipitaciones que se presentan son principalmente convectivas y por influencia de los vientos alisios que traen humedad del Atlántico (Strahler y Merali, 2008; Orellana et al., 2007). Durante la época de verano, la presencia de huracanes en el Atlántico genera lluvias en la costa al aproximarse a ésta, y su influencia se va debilitando gradualmente a medida que el centro de baja presión avanza hacia el interior (Márdero S. N., 2012)

La mayor parte de la península presenta dos periodos de sequía: la pre-estival o de primavera, que abarca un periodo de dos a cuatro meses (entre enero y abril), y la intra-estival o canícula que se presenta durante julio y agosto (Orellana et al., 2009). Esta última se debe a perturbaciones en los vientos alisios. En verano se presenta un sobrecalentamiento del mar en la porción tropical del Pacífico oriental, por debajo de la zona intertropical de convergencia, lo cual debilita el gradiente barométrico y,

por ende, disminuye la intensidad de los alisios. Lo anterior trae como consecuencia una disminución en la frecuencia y cantidad de lluvia, así como un patrón bimodal del régimen pluvial en los territorios que afecta. (Magaña, Amador, & Medina, 1999).

La Hidrología de esta región carece de una red fluvial. El escurrimiento es casi

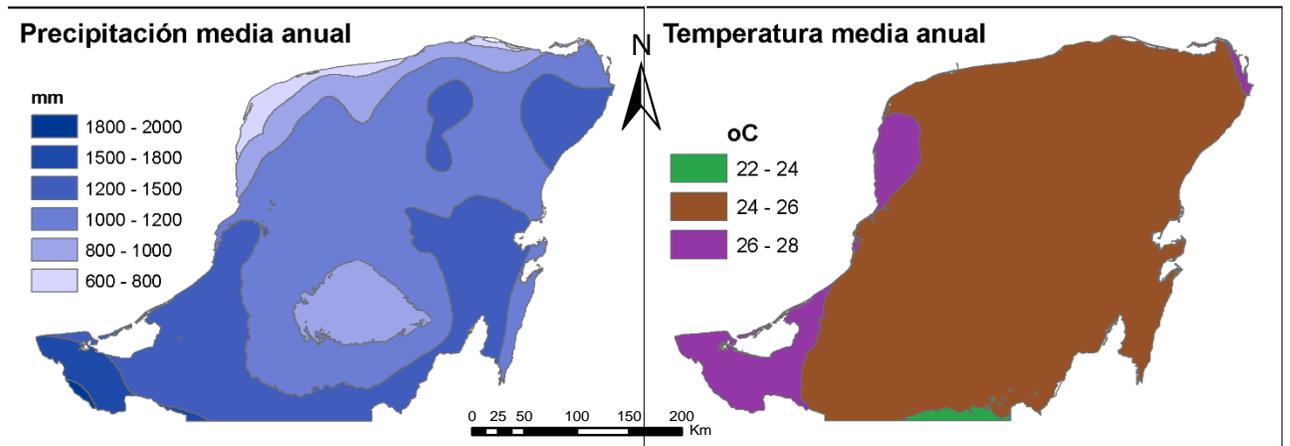


Figura 10: Precipitación y Temperatura media anual, Yucatán. Elaborado a partir de datos INEGI.

totalmente subterráneo favoreciendo la formación de sistemas cársticos. Las aguas superficiales de importancia en la región son las de los ríos Candelaria, Palizada, Champotón y Hondo en el estado de Campeche, aunque existen otros arroyos o cuencas sin escurrimiento base que responden muy rápidamente en condiciones de tormenta.

En el resto de la región los arroyos o corrientes son intermitentes y normalmente descargan en sumideros que funcionan cuando tienen suficiente carga hidráulica. La cuenca del río Candelaria es la que tiene los mayores caudales de aguas superficiales, y en donde por sus características fisiográficas y presencia de lluvias intensas, se presentan inundaciones periódicamente, que afectan a los habitantes asentados en las partes bajas aledañas al cauce principal (CONAGUA).

El estado de Yucatán es famoso por la presencia de una gran cantidad de los llamados cenotes, que son acuíferos subterráneos expuestos, formados por el hundimiento total o parcial de la bóveda calcárea. También son frecuentes y voluminosos los acuíferos subterráneos no expuestos, que forman un sistema de vasos comunicantes que desembocan al mar, con profundidades de niveles

freáticos que varían de dos a tres metros en el cordón litoral, hasta 130 m en el vértice. Es importante mencionar que en el estado yucateco hay una ausencia total de corrientes superficiales de agua, sin embargo, están presentes los cuerpos de agua superficiales L. Flamingos y L. Rosada, así como los Esteros Celestún, Yucalpetén, Río Lagartos, El Islote y Yolvé.

La escasa red de corrientes superficiales de agua influye en la poca presencia de barreras naturales contra incendios. Además de favorecer la sequedad de la vegetación en épocas de sequía meteorológica.

2.2.4. Suelo y Vegetación

Los suelos de la península yucateca, en general, proceden de una base calcárea, distribuidos sin grandes accidentes geográficos y de formación reciente. Miranda en 1958 los describía con elevaciones de 0 a 275 msnm, siendo en la Sierrita de Ticul, donde alcanzan su mayor altitud. Tal como se planteó en la descripción geológica, son de origen marino, con rocas calcáreas de reciente formación, Mioceno y Pleistoceno.

Puede decirse que los suelos de la península son aluviales y coluviales, formados por depósitos de material de acarreo de las partes más altas de las laderas y elevaciones de la roca cárstica. En este suelo, la erosión que se produce es regular y el suelo no se pierde por los huecos de la roca que comunican con grutas y cenotes. Se puede asegurar que los suelos no son maduros en su mayoría a excepción de las dolinas de color rojo muy intenso, que se encuentran en franco proceso de litosolización.

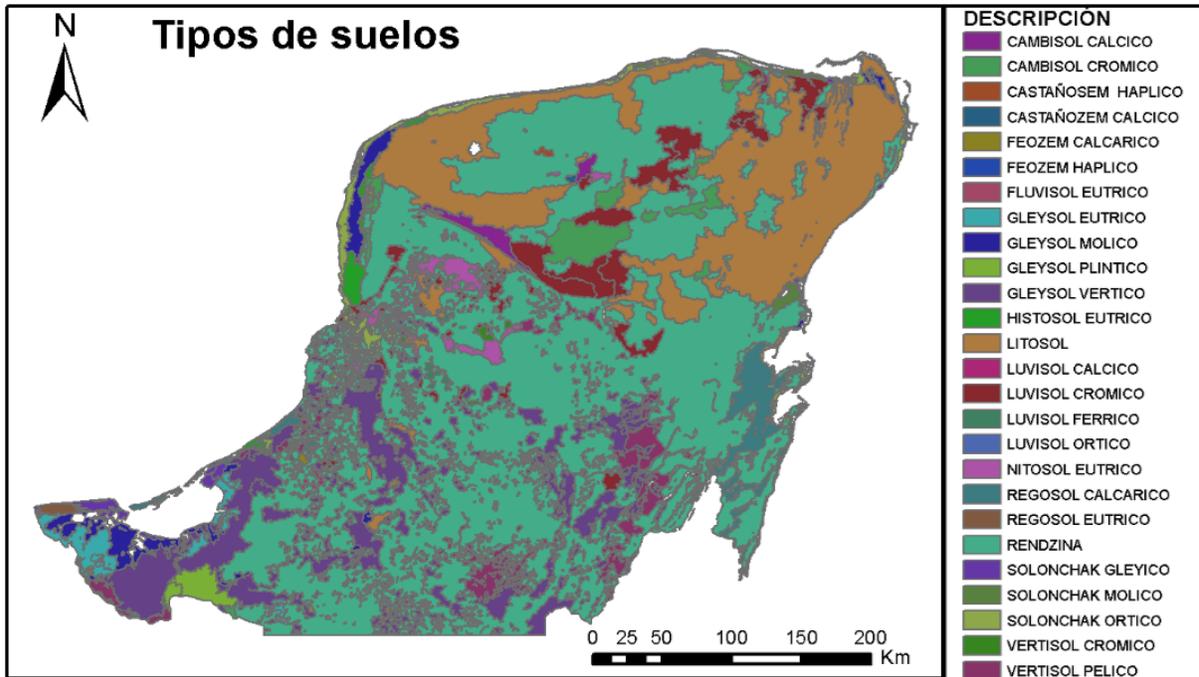


Figura 11: Tipos de suelos, Península de Yucatán, 2016. Elaborado a partir de datos de INEGI.

Según la clasificación Fao/Unesco de los suelos, modificada por Dggtenal, los suelos de la península yucateca se dividen en las unidades siguientes:

Acrisol: suelo con acumulación de arcilla en el subsuelo, ácido y/o muy pobre en nutrientes, de color rojo o amarillo claro, en él se encuentra la selva mediana caducifolia. En la península solo existe una pequeña porción al noroeste de la ciudad de Campeche.

Arenosol: son suelos de textura arenosa, con hundimiento muy bajo, en ellas se distribuye una parte de selva alta perennifolia y tñtales, existe una pequeña porción en el municipio de Palizada, Campeche.

Cambisol: es suelo joven y poco desarrollado, el subsuelo está formado de capas con terrones, en ellos se localiza la selva mediana subcaducifolia. En relación con el tipo de roca subyacente con acumulaciones de arcillas y calcio, presentan cambios. Los suelos de la parte central de Yucatán, del norte de Campeche y algunas islas como banco Chinchorro, carecen de la fase física, son crómicos y de poca cobertura, en ellos se distribuye la selva mediana subcaducifolia.

Gleysol: se le encuentra en todo tipo de climas y zonas donde se estanca el agua en épocas de lluvias. La parte saturada con agua presenta color azul verdoso o gris con manchas rojas por la desecación, a veces con acumulaciones de suelos, especialmente cuando están cerca de la costa, casi siempre tiene gramíneas e hidrófitos como taludes o vegetación de aguadas, sin fases físicas y químicas y por lo general no son buenos para el cultivo. En la península se ubican rodeando la parte sur de la laguna de Términos, Campeche y algunas zonas de las bahías la Ascensión y Espíritu Santo en Quintana Roo, los tipos de asociaciones que encontramos son hidrófitos, manglares y selva baja inundable (tintales).

Histosol: es propio de climas húmedos y cálidos, se localiza en zonas pantanosas, generalmente en lugares donde se estancan aguas y desechos de plantas sin descomponerse, con grandes cantidades de materia orgánica en forma de hojarasca, fibras, maderas o humus. Cubre la parte norte de Campeche y de Quintana Roo, en donde rodea la bahía la Ascensión y la base de Punta Herrero, el tipo de vegetación es de duna costera y manglar.

Litosol: Suelo de distribución muy amplia, se le encuentra en todos los climas, sin desarrollo, con profundidades de 10 cm, tiene características muy variables, según el material que lo forme, se le encuentra cubriendo en la zona norte de Campeche, centro y norte de Quintana Roo, parte central y norte de Yucatán y algunas islas como la de Alacranes. En él encontramos selva baja caducifolia, baja caducifolia espinosa, mediana subcaducifolia, mediana subperennifolia y algunos manglares achaparrados.

Regosol: las capas de este tipo de suelo son semejantes a la roca que le dio origen. Son suelos calcáreos privativos de lugares con climas del tipo Aw0, Aw1 y Aw2, se encuentran en la parte sureste de Campeche, el tipo de vegetación que presentan es de selva mediana subperennifolia y petenes.

Rendzina: cubre la mayor extensión peninsular y junto con los suelos litosol y luvisol es considerado de gran importancia; ocupa el centro, norte y sur de la península de Yucatán, llegando a la frontera con Guatemala; abarca la mayor parte de los estados de Quintana Roo y Yucatán.

Solonchak: son suelos que poseen un alto contenido de sales que pueden ser encontradas, tanto en la totalidad como en algunas partes de los mismos, son propios de los lugares con clima Aw. Se les localiza bordeando la Laguna de Términos, en el norte de Campeche, en Yucatán y en la costa del mar Caribe en Quintana Roo; hay manglares agudas, sabana, selva baja caducifolia y vegetación de duna costera.

Vertisol: es un suelo muy duro que presenta grietas anchas en época de sequía, de tipo arcilloso y masivo; frecuentemente negro, gris y rojizo. Es de clima cálido húmedo con diferentes tipos de vegetación, principalmente selva mediana subcaducifolia y perennifolia se le encuentra en Campeche y Quintana Roo.

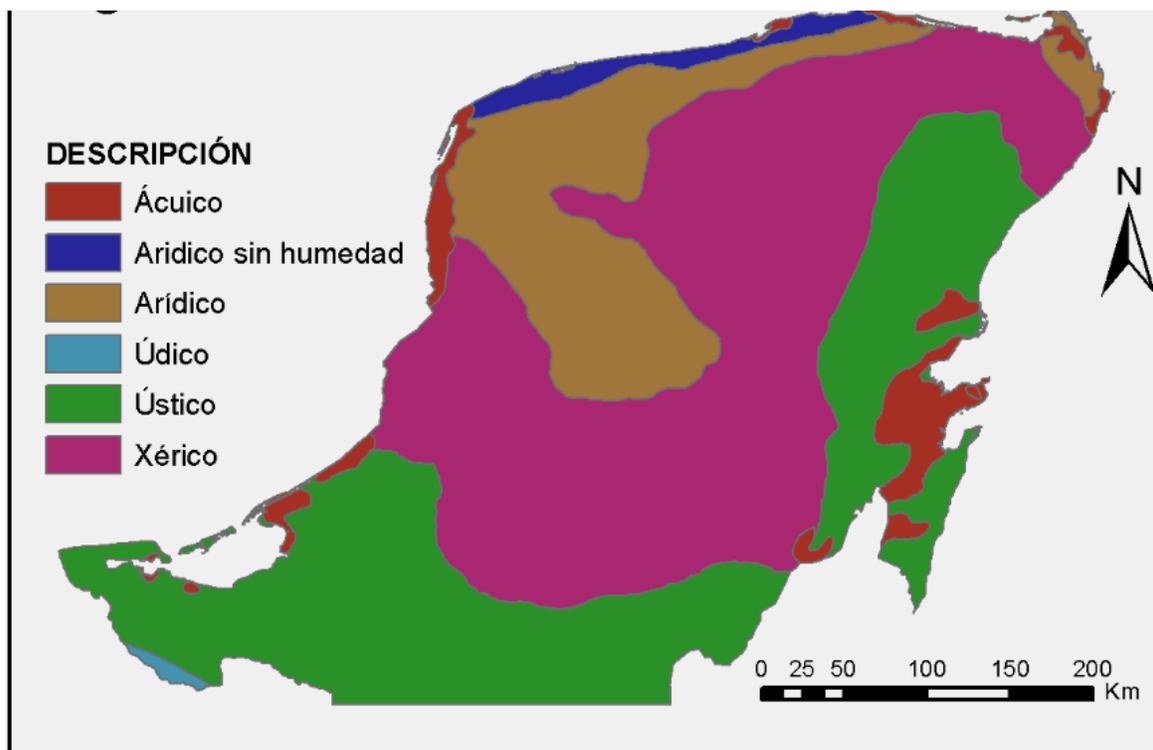


Figura 12: Regímenes de humedad del suelo, Península de Yucatán. 2016. Elaborado a partir de datos de INEGI.

La humedad del suelo también es determinante para la ocurrencia de incendios. En suelos de muy baja humedad o nula (xérico, arídico, etc) va a ser más probable la formación de incendios al haber factores desencadenantes de estos. La figura 12 muestra esta distribución.

De acuerdo al tipo de clima y su distribución en la península, analizados anteriormente, se encuentran tipos de vegetación xerófila y halófila; así como, selva baja caducifolia espinosa. Además se distribuyen otros tipos de vegetación tales como el de dunas costeras y manglar así como de selva baja caducifolia, selva media subcaducifolia, especialmente en el estado de Yucatán. En la parte noroeste de Campeche se distribuyen los petenes, la sabana e hidrofitos en humedales costeros. En la medida que el clima se va tornando más húmedo permite disminuya el número de especies que eliminan las hojas en la época de seca y aparece vegetación del tipo subcaducifolia hasta las selvas perennifolias o siempre verdes.

En la Península de Yucatán las selvas están bien representadas por selva mediana y baja caducifolia en el estado de Yucatán mientras la selva alta y mediana subperennifolia, mejor distribuidas, en los estados de Campeche y Quintana Roo (Aguilar & Domínguez, 2016).

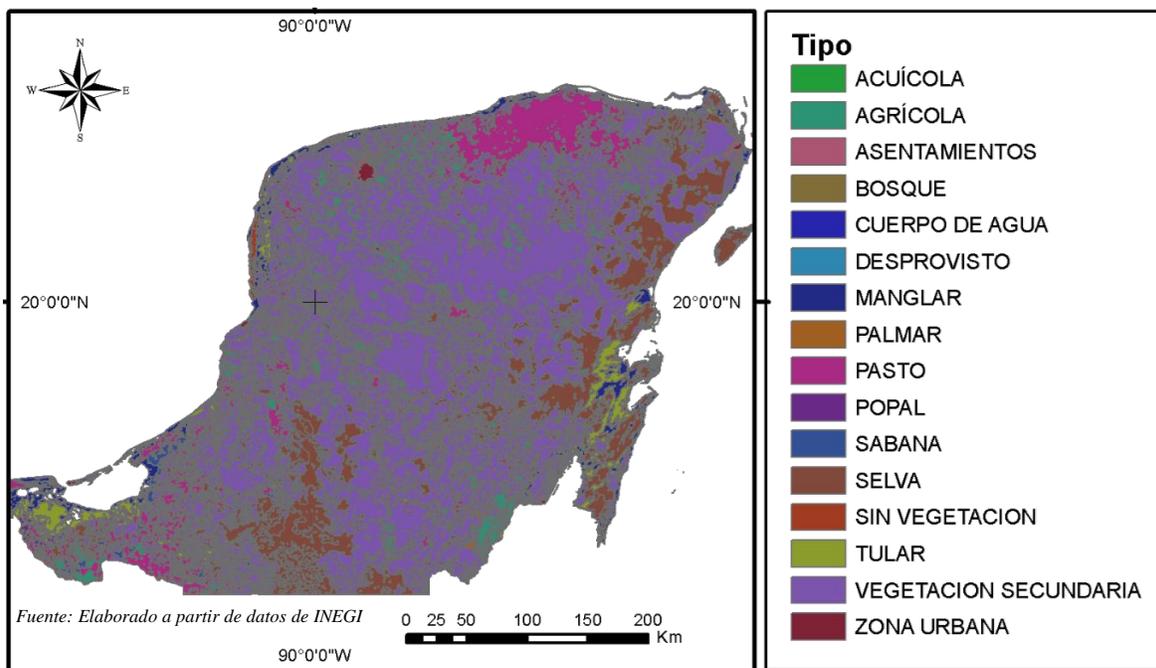


Figura 13: Uso del suelo. Península de Yucatán, 2016. Elaborado a partir de datos INEGI.

En los últimos años la vegetación de la región peninsular, así como en gran parte del resto de México, está siendo sometida a un proceso de deforestación, entre otras causas debido a incendios para incrementar áreas dedicadas a la agricultura de subsistencia.

Las causas de la deforestación son muy variadas y se pueden indicar de la siguiente manera: por cambio de uso del suelo para agricultura, fruticultura, ganadería, asentamientos humanos, construcción y funcionamiento de vías de comunicación (principalmente carreteras); en la construcción de presas, explotación del subsuelo, turismo; aprovechamientos inadecuados de los recursos forestales, sobreexplotación selectiva de pocas especies, desconocimiento de tecnologías para el aprovechamiento de maderas principalmente duras tropicales, aplicación de políticas inadecuadas en los planes de desarrollo forestal, falta de aplicación de técnicas silvícolas adecuadas a las diferentes regiones del trópico; y por otros factores como fenómenos meteorológicos (principalmente huracanes y ciclones), incendios, plagas, enfermedades (Toledo, 1992; Schmink, 1995; Santos, 1997 de (Aguilar & Domínguez, 2016)).

Las tendencias indican una disminución notable en sus superficies. Este caso es muy alarmante debido a la frágil naturaleza de sus suelos, y por su escasa capacidad de recuperarse (Flores & Espejel, 1994)

2.3. Características socioeconómicas

La sociedad y su relación con el medio desempeñan un papel determinante en la transformación del territorio. En dependencia de cuales sean sus intereses, aspiraciones, necesidades, posibilidades, etc. así como el propio medio en el que se desarrolla será mayor o menor el grado de incidencia sobre el espacio. Dentro de este aspecto, la población y su actividad económica son las de mayor peso en la ocurrencia de incendios forestales, a fin de saber que son por causas humanas la mayoría de éstos.

2.3.1. Población y Poblamiento

La población de la península de Yucatán conforme ha ido incrementando el nivel de desarrollo de la región. En ello ha sido fundamental la transición de una economía basada en actividades extractivas a una economía de actividades industriales y de servicios como el turismo. Estas actividades, últimas, han marcado diferencias

sociales y de ocupación del espacio entre el norte y sur de la península. De la misma forma se dan en la distribución de los incendios forestales.

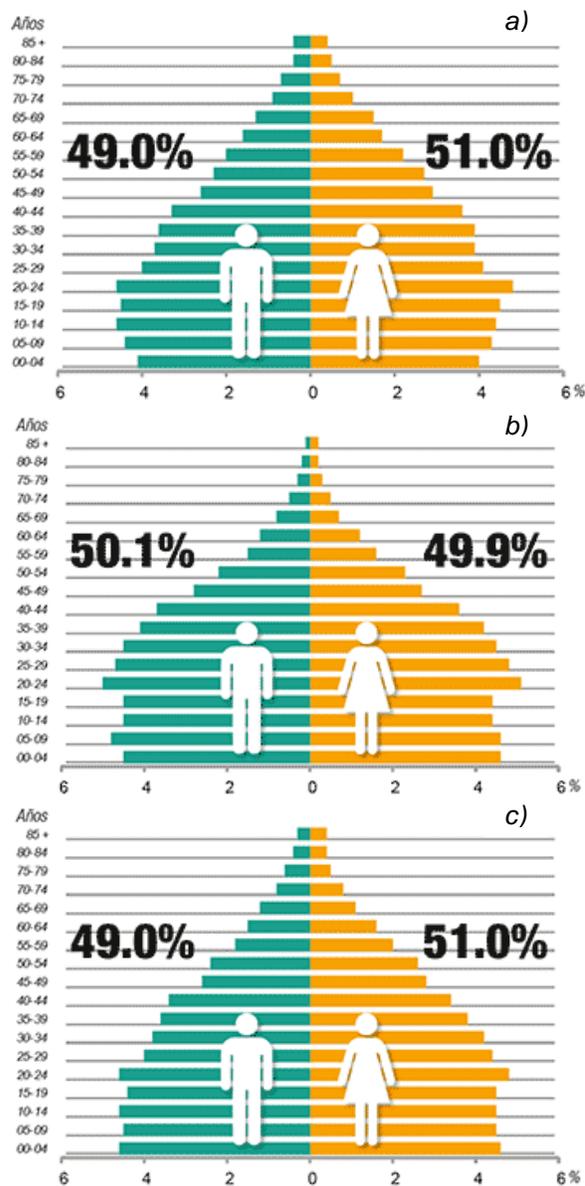


Figura 14: Pirámides de Población, INEGI 2015. Yucatán (a), Quintana Roo (b), Campeche (c).

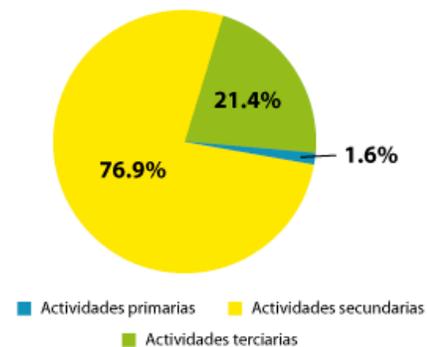
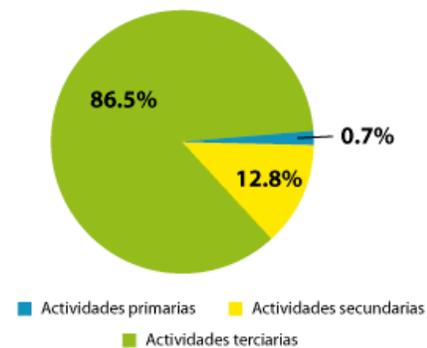
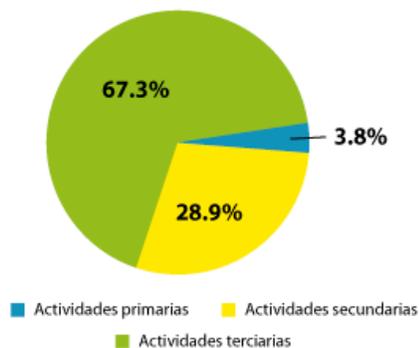


Figura 15: Aporte al PIB según sectores económicos, INEGI 2015. Yucatán (a), Quintana Roo (b), Campeche (c).

La composición sexo-etaria de la población muestra una proporción similar entre hombres y mujeres. La pirámide poblacional es del tipo expansiva característica de países subdesarrollados con altas tasas de natalidad y mortalidad. Una economía

basada en actividades extractivas y/o subsistencia para la mayoría de la población (Ver figura 14). También es visible el efecto de las migraciones en la población superior a los 24 años, fundamentalmente en el estado de Quintana Roo por el auge del turismo.

La ocupación del espacio se ha dado de forma concentrada en el norte de la región, asociada a espacios económicos como turismo e industrias (maquilas) y la región turística del Carmen y petroleras de Campeche. El resto de la población está dispersa en zonas rurales (en 2015, INEGI calculaba un 65.9 % de población rural). Esta población ejerce un peso mayor en la transformación del espacio, generalmente asociado a actividades agrícolas.

La emigración campo-ciudad se realiza de dos formas: definitiva y pendular. La definitiva alimenta el crecimiento de las ciudades, de las cuales las que tuvieron el mayor avance en el periodo estudiado son Cancún, Mérida, Ciudad del Carmen, Chetumal y, recientemente, Playa del Carmen (Baños Ramírez & Castañeda Navarrete, 2007)

2.3.2 Actividades económicas

De forma general la península basa su economía en las actividades secundarias y terciarias apoyada en el auge de la industria de maquilas y el turismo de sol y playa así como el histórico asociado a las culturas prehispánicas. La figura 15 muestra el aporte de cada sector económico a la economía del estado.

El crecimiento del PIB ha llevado a un avance acelerado de las ciudades y un deterioro de las condiciones de producción campesinas. Lo anterior propicia que los jóvenes emigren en busca de empleo, mientras la familia lucha para sobrevivir sin poder pasar hacia una organización productiva de tipo capitalista. De hecho, la península yucateca transitó de una economía agraria a una terciarizada. En efecto, los datos de la PEA de las tres entidades muestran una caída del porcentaje de la ocupación en el sector primario en el periodo 1970-2000 (Baños Ramírez & Castañeda Navarrete, 2007).

Yucatán

La economía del estado descansa en el sector terciario, principalmente en el turismo, que ocupa poco menos de 60 % de la población económicamente activa.

A grandes rasgos se apunta: la ganadería, la porcicultura y la avicultura yucateca proveen gran parte de la carne que se consume en Quintana Roo. De igual manera, algunas frutas y muchas hortalizas que se sirven en los restaurantes provienen de otra zona agrícola de Yucatán.

El sector de agricultura y ganadería engloba cultivo de frutas, principalmente limas y limones, vegetales y henequén. También trabajan con ganado vacuno, porcino y con producción pesquera, aunque este último sector ha sufrido una notable disminución. Yucatán también es un importante productor de miel de abeja. En el estado existe insuficiente coordinación entre la producción y la comercialización; por esta razón se han ido perdiendo empleos en el sector agropecuario.

La presencia de fábricas en Yucatán es relativamente escasa en comparación con otros estados. Yucatán tiene unas 68 maquiladoras que emplean unos 20 mil trabajadores. Las inversiones que existen son principalmente en el sector de textiles e indumentaria. Esto se debe al bajo costo en mano de obra que pagan las empresas en Yucatán. Las principales industrias son la alimenticia, las bebidas y el tabaco. Les siguen las textiles, las de indumentaria y las de productos de cuero. En tercer lugar están las industrias de los aceites y derivados del carbón, industrias químicas, de plásticos y de caucho (Baños Ramírez & Castañeda Navarrete, 2007).

Campeche

Las principales actividades económicas de Campeche son la extracción de petróleo, el turismo, la industria maderera, la agricultura y la pesca. Su localización en el golfo de México le proporciona a Campeche acceso a los recursos petrolíferos de la zona, siendo una de las principales fuentes de riqueza de México.

Tradicionalmente, el turismo, no ha sido una actividad económica principal en Campeche. Sin embargo, en los últimos tiempos ha experimentado un fuerte

impulso. Se centra menos en las playas y más en los parajes naturales salvajes y las ruinas mayas que se conservan en el estado.

La industria maderera, aunque en declive, la madera fue una de las principales fuentes de riqueza de Campeche durante mucho tiempo. A comienzos del siglo XX estaban instaladas en Campeche casi una decena de empresas madereras estadounidenses. La exportación de madera de buena calidad procedente de los bosques y selvas del estado se prolongó durante décadas. Actualmente su impacto en la economía es mucho menor. Aun así todavía existen numerosas especies tropicales con potencial industrial para ser transformadas y vendidas al exterior (www.lifeder.com).

El sector agrícola siempre estuvo eclipsado por el pesquero en Campeche. Sin embargo, el estado es actualmente el primer productor nacional de chicozapote, arroz palay y semilla de calabaza. La mayor parte de los cultivos se destinan al autoconsumo y los constituyen pequeños terrenos en zonas rurales despobladas.

Quintana Roo

Las actividades económicas de Quintana Roo están representadas en un 80 % por el sector turismo. Desde el punto de vista económico, ocupa el quinto lugar a nivel nacional. Esta industria turística se concentra principalmente en Cancún, uno de los destinos turísticos predilectos a nivel mundial. También es el caso de la Riviera Maya Costera, desde Puerto Morelos hasta Tulum y Cozumel.

Debido a que es el estado con mayor zona selvática del país, la producción maderera representa otro de los importantes ejes en los que se soporta la economía quintanarroense. Un gran número de sus comunidades rurales se sustenta en la producción de maderas ligeras, livianas y pesadas, como la caoba y el cedro. Otro producto forestal obtenido de los bosques es el chicle, una savia pegajosa y blanca empleada como materia prima en la producción de golosinas.

La industria manufacturera está principalmente desarrollada en los municipios Benito Juárez y Othón P. Blanco, en los rubros alimentos, bebidas y tabaco. La creciente actividad manufacturera de Quintana Roo en la actualidad genera salarios

equiparados a los obtenidos en la industria turística, ocupando el segundo lugar en la aportación al Producto Interno Bruto (PIB) estatal.

La agricultura es el sostén económico de las zonas rurales de Quintana Roo. Principalmente se cultiva arroz, frijol, chile, sorgo, cacahuete, soya, tomate, papaya, sandía, toronja, caña de azúcar, naranja y variedad de hortalizas.

En la península de Yucatán tanto la producción petrolera cuanto la maquila funcionan como una economía de enclave. Siguiendo la subdivisión de Cardoso y Faletto, la producción petrolera se podría identificar con las características del enclave minero, y la maquila con las formas del enclave de plantaciones (Baños Ramírez & Castañeda Navarrete, 2007).

Aunque en la península predominan las actividades terciarias, éstas están concentradas en el espacio urbano sobre ocupado correspondiente a las principales ciudades de la región. Mientras que las actividades primarias tienen menor peso pero mayor ocupación del suelo. Aparejado a las actividades agrícolas, en la región existe la práctica de quemar áreas antes de llegar la temporada de siembras. Esta práctica es de carácter autorizado por políticas gubernamentales estableciendo el periodo comprendido entre febrero a mayo para dicha actividad.

Durante este periodo se queman considerables cantidades de hectáreas dedicadas a la agricultura así como áreas de vegetación secundaria para uso agrícola. Este tipo de práctica, al ser controlada no es considerado como incendios y por tanto su aporte a la emisiones de gases no está considerada en las estimaciones de éstos.

CAPITULO 3: ÁREAS QUEMADAS Y BIOMASA AFECTADA EN LA PENÍNSULA DE YUCATAN

La quema de biomasa está muy extendida, especialmente en los trópicos. Esta puede darse con fines energéticos como es el caso de las plantas de biomasa, actividades del hogar, etc. Otra forma de quemar biomasa, de mayor impacto ambiental, es mediante los incendios forestales. La mayoría de las veces, estos, responden a factores y procesos antropogénicos. Es el hombre y su actividad los que hacen que la quema de biomasa se convierta en un peligro ambiental.

Sirve para despejar tierras para el cultivo migratorio, para convertir bosques en tierras agrícolas y pastorales, y para eliminar la vegetación seca con el fin de promover la productividad agrícola y el crecimiento de pastos de mayor rendimiento. Además, gran parte de los desechos agrícolas y la leña se queman, especialmente en los países en desarrollo. (Crutzen & Andreae, 1990).

Bajo este principio de uso de la quema de biomasa muchas áreas de la península yucateca son quemadas cada año. Para ello los agricultores esperan la temporada de incendio y autorizo de quema forestal comprendida entre los meses de enero a mayo. A este tipo de quema de biomasa y sus áreas afectadas se dedicará este capítulo.

3.1. Comportamiento de los Incendios forestales

Los incendios forestales son muy complejos de cuantificar, tanto en número como en extensión. Una primera aproximación es el resultado de una red de vigilancia distribuida por todo el país y perteneciente a la CONAFOR. Esta, junto a la CONABIO, trabaja por detectar, monitorear y mitigar la ocurrencia de incendios; así como las estadísticas asociadas a éstos.

El INEGI, en su anuario estadístico y geográfico correspondiente al año 2017, reportaba la ocurrencia de 216 incendios forestales en la península de Yucatán³ y 13 205 Ha afectadas. El problema de estos reportes es que son generales al espacio

³ Para la península se tomó la suma de los incendios reportados para cada estado perteneciente; es decir, Campeche, Quintana Roo y Yucatán.

y tiempo, es decir, no brindan información referente al lugar y momento de ocurrencia lo que disminuye el análisis de impacto. Sin embargo, CONABIO reporta en su sitio web la detección de puntos de calor asociados a incendios potenciales. Con estos puntos de calor es posible aproximarse al comportamiento espacial y temporal de los incendios forestales en la región de interés.

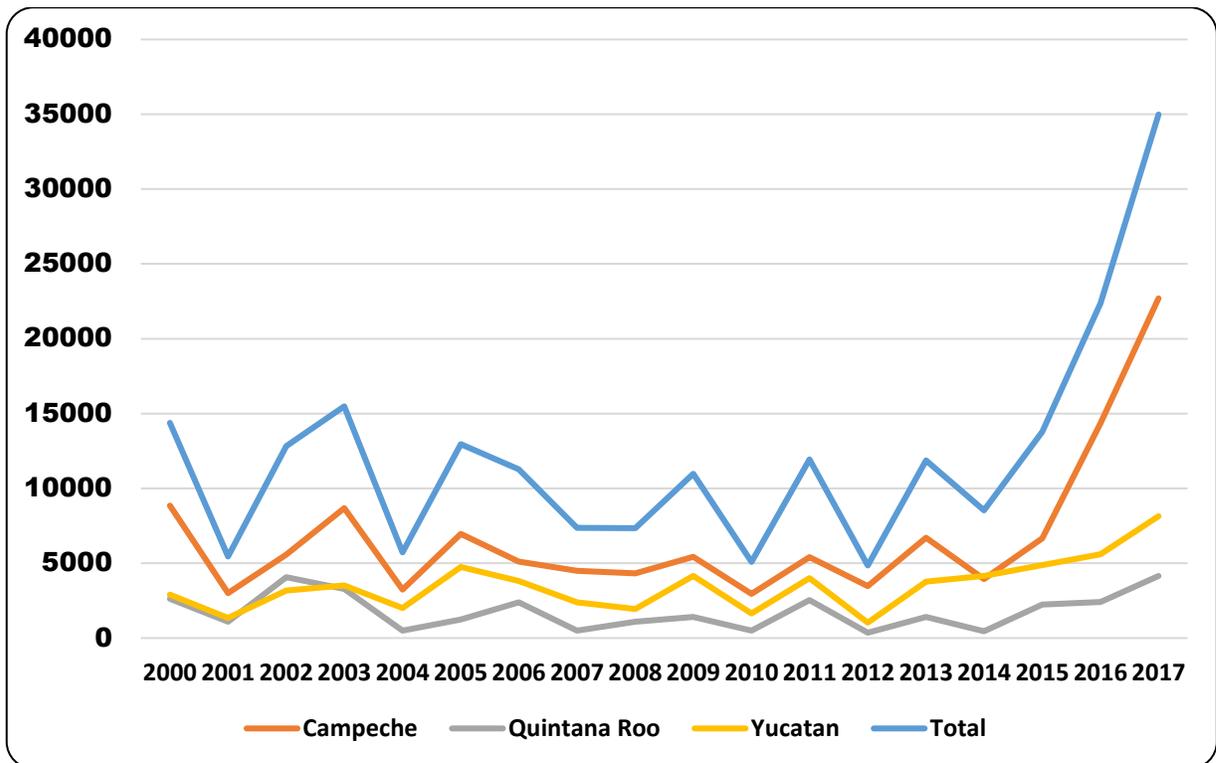


Figura 16: Puntos de calor, según estado y año. Península de Yucatán. Elaborado con datos de CONABIO. 2000 – 2017.

La figura anterior muestra la tendencia temporal en los últimos 17 años de los puntos de calor en la región peninsular. Obsérvese como no hay una tendencia o estacionalidad marcada aunque se caracteriza por alternarse años con picos máximos y picos mínimos. Esto podría relacionarse con la diferenciación en cuanto a lluvias, temperaturas y sequías que cada año tiene la región. Sin embargo, si es notable la tendencia al incremento, en el número de puntos de calor, desde el año 2014. Destaca el año 2017 como el de mayor incidencia de estos puntos. Razón por la cual se decidió utilizarlo para este estudio.

El Estado de Campeche es el de mayor incidencia en la quema de biomasa por incendios forestales, al menos tomando como referencia la cantidad de puntos de calor que son detectados en su interior. Le sigue el Estado de Yucatán y finalmente Quintana Roo. Esto responde a la ubicación y ocupación del espacio de cada estado, según lo explicado en el capítulo anterior. El Estado de Campeche responde a mayor especialización en actividades agroproductivas y a una “cultura” de incendios asociados.

Teniendo en cuenta el comportamiento temporal de los puntos de calor en el año y como media mensual se obtuvo el gráfico mostrado en la figura 17. Véase como los meses de marzo a mayo son los de mayor incidencia en cuanto a puntos de calor. Estos meses también corresponden con la temporada de incendios. De ahí que se utilizara este periodo para el análisis en el estudio. También Campeche sigue teniendo mayor incidencia de puntos de calor por mes aunque en enero es el Estado de Yucatán el que registra mayor cantidad de puntos de calor.

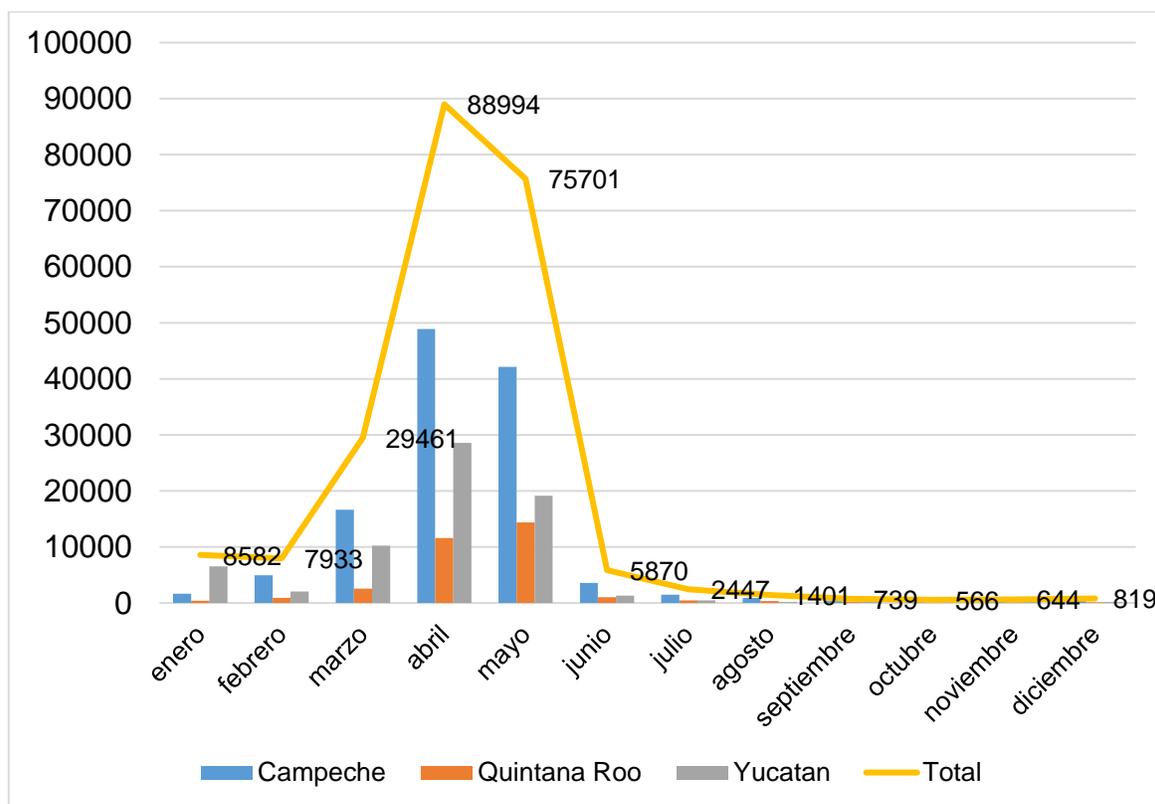


Figura 17: Puntos de Calor según mes y estado. Península de Yucatán 2000 - 2017. Elaborado a partir de CONABIO.

Otro aspecto de interés en el análisis general de los incendios de la península es su distribución espacial. La figura 18 muestra el comportamiento espacial de los puntos de calor en el periodo de 2000 a 2017. Teniendo en cuenta la cantidad media anual de puntos de calor, comprendidos en el periodo anterior, se puede comprobar el peso que tiene el Estado de Campeche en la quema de biomasa. Destacan los municipios de Campeche, Carmen y Candelaria con mayor actividad de quema de biomasa por incendio forestal.

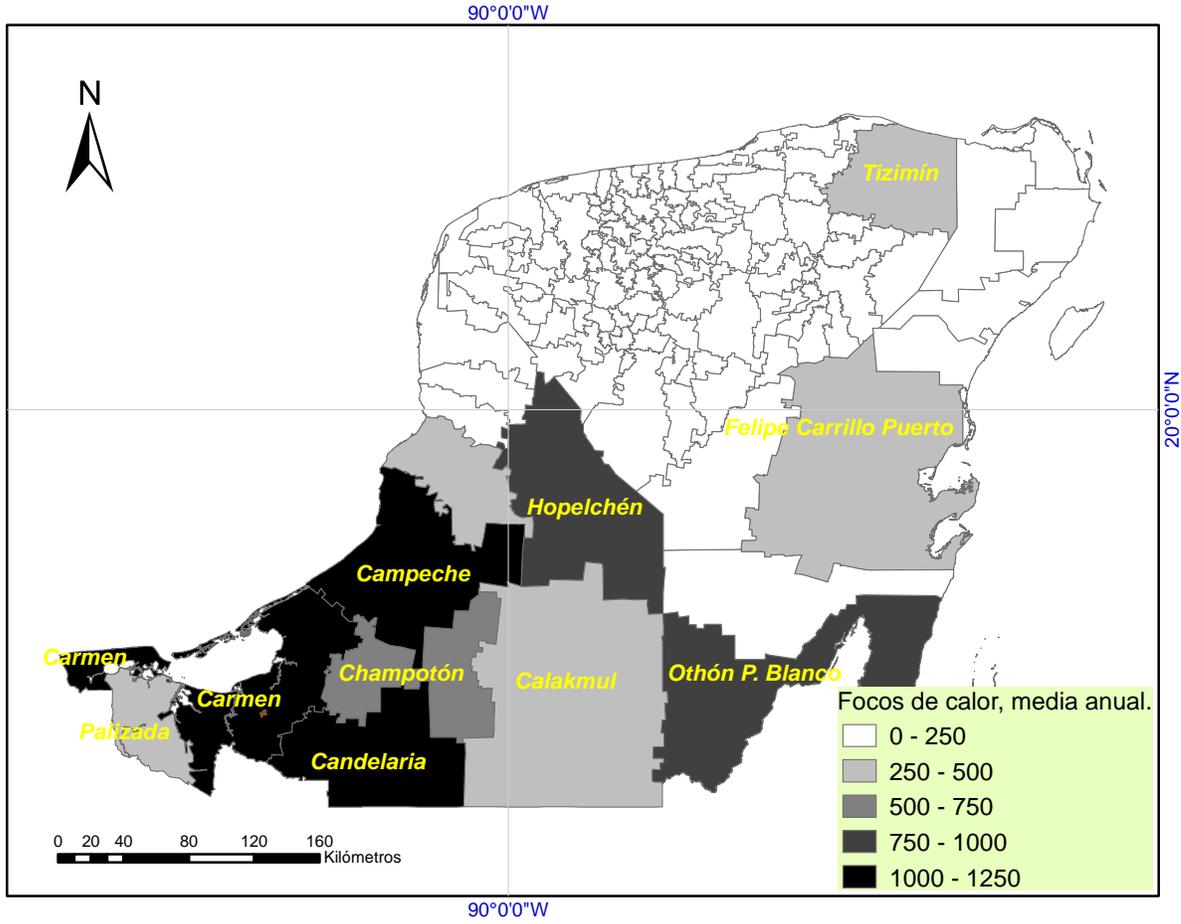


Figura 18: Puntos de calor (media anual), según municipios. Península de Yucatán 2000 - 2017. Elaborado con datos de CONABIO.

La distribución de los puntos de calor en el año 2017 (año de mayor registro y objeto estudio) se puede observar en la figura 19. Véase como la mayor parte de la península estuvo ocupada por estos puntos. Otro aspecto a notar es la coincidencia de áreas libres de puntos de calor con áreas protegidas (Calakmul en Campeche), turísticas (en Quintana Roo) y político – administrativas de poder como en Yucatán.

Reforzando el hecho de que los incendios ocurren por causas antrópicas y en lugares de bajo control.

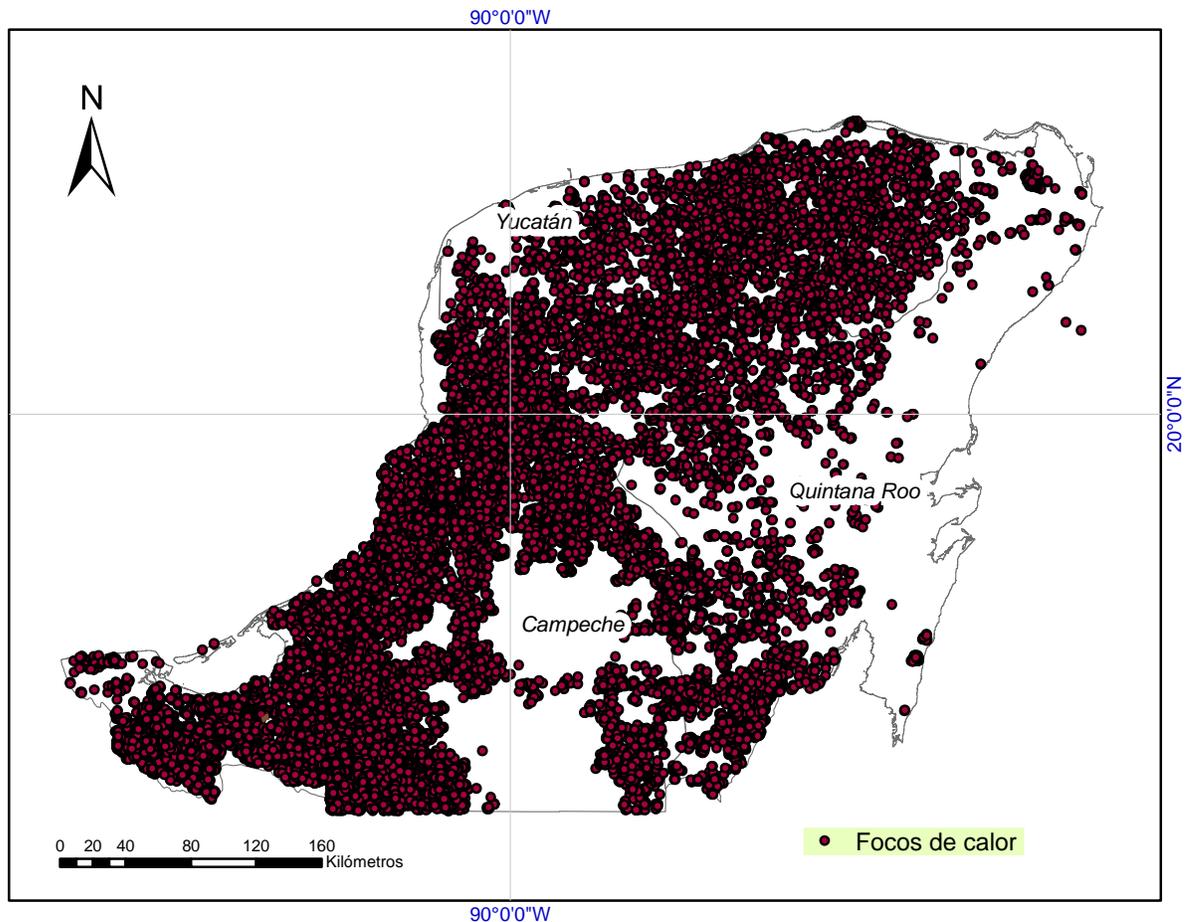


Figura 19: Puntos de calor, Península de Yucatán, 2017. Elaborado con datos de CONABIO.

Es un hecho la alta incidencia de puntos de calor en la región peninsular de México que indica también alta incidencia de incendios forestales. Resulta interesante entonces con esa cantidad de incendios saber la superficie y vegetación quemadas.

3.2. Estimación de áreas quemadas

Un incendio forestal es capaz de devastar extensas áreas de vegetación en poco tiempo. Basta con juntarse las condiciones meteorológicas propicias para su propagación y el resultado es un cambio abrupto de uso del suelo. Sin embargo cuantificar la superficie quemada es una tarea complicada cuando el incendio ocurre en áreas inaccesibles o se desconoce la ocurrencia del mismo. Para este estudio

se utilizó herramientas geomáticas⁴ para la estimación de las áreas quemadas por incendios forestales. La figura 20 muestra el comportamiento espacial y temporal (mes a mes) de las áreas quemadas durante la temporada de incendios del 2017.

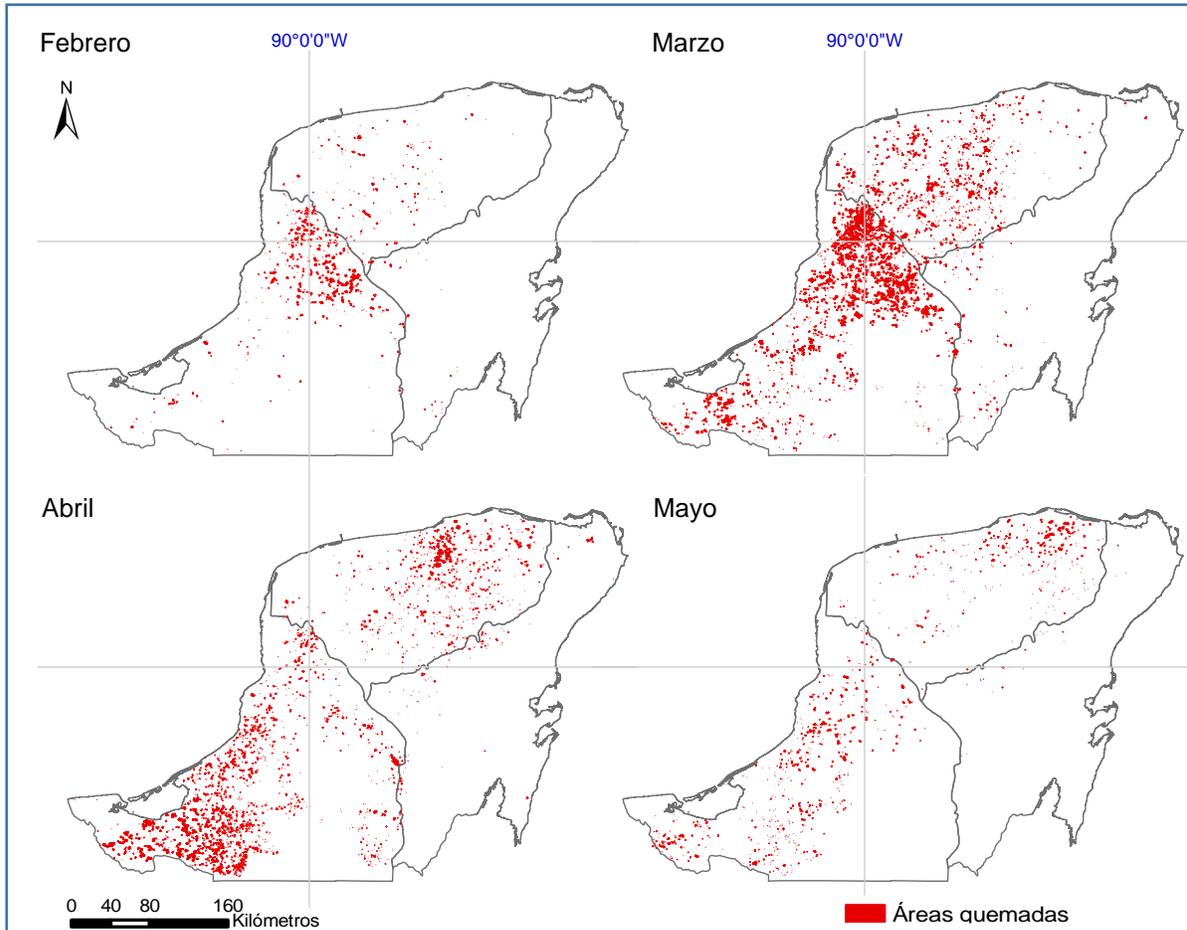


Figura 20: Áreas quemadas, según mes de la temporada de incendios 2017.

Los meses de marzo y abril corresponden con las mayores superficies quemadas, como puede observarse en la figura 20. Mismo resultado que se plantea en la figura 17, según la ocurrencia medio anual de incendios para la región, corroborando tal comportamiento. Ambas figuras muestran estos meses como los de mayor problemática relacionada con la quema de biomasa.

La temporada de incendios 2017, para la región de la Península de Yucatán, dejó un estimado cercano a 130 mil hectáreas quemadas por incendios forestales. Los

⁴ Véase acápite metodología del capítulo 1 para más detalles en el procedimiento seguido para la estimación de las áreas quemadas.

cálculos cartográficos correspondientes al análisis arrojaron además como estimación que en el mes de febrero se quemó el 10%, del total quemado al finalizar la temporada. En el mes de marzo el 45%, abril un 36% y mayo apenas el 9%. La figura 21, muestra, las áreas quemadas en todo el periodo de incendios comprendido entre febrero y mayo.

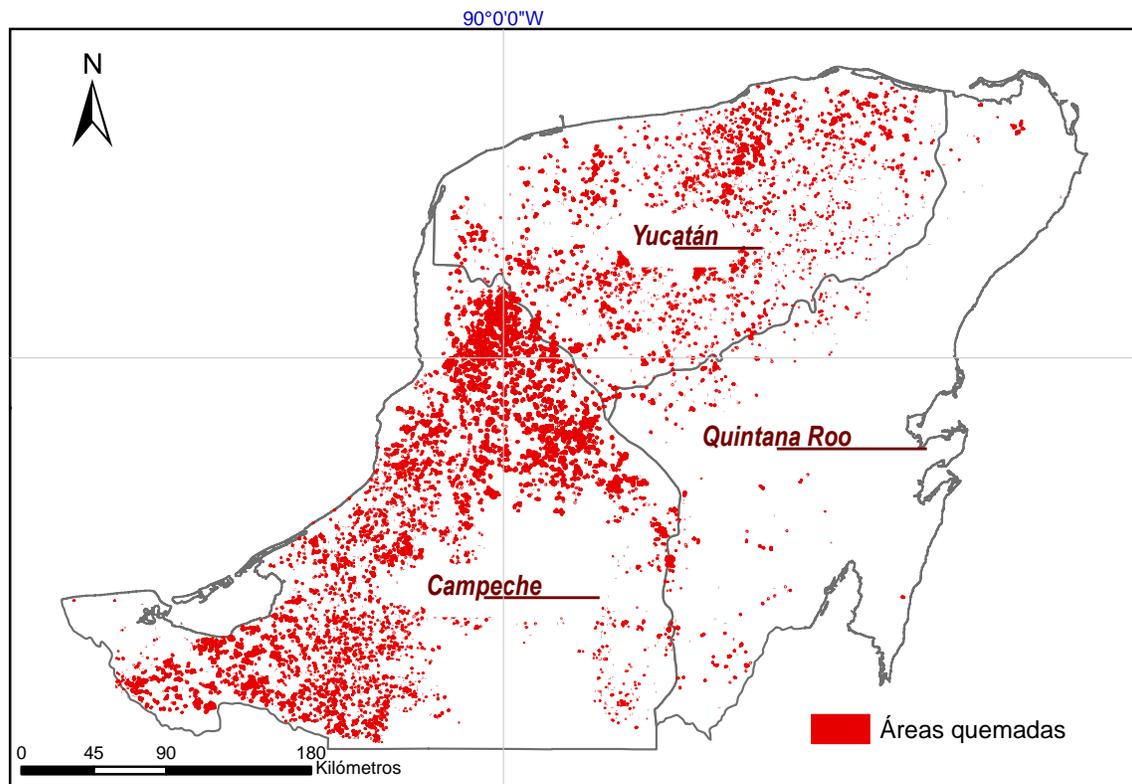


Figura 21: Áreas quemadas en la temporada de incendios 2017.

La figura 21 muestra además, correspondencia con el comportamiento de los puntos de calor descrito anteriormente. Obsérvese como los estados de Campeche y Yucatán presentan mayor cantidad de áreas quemadas, especialmente Campeche. Este estado destaca por su incidencia en prácticamente todo su territorio con excepción de la reserva de la biosfera, Calakmul, donde muy pocas áreas resultan quemadas.

Una vez obtenida las áreas quemadas por los incendios forestales resulta interesante estimar, además, el tipo de vegetación y la cantidad de biomasa quemadas.

3.3. Estimación de biomasa.

Uno de los principales objetivos detrás de cualquier estudio sobre incendios forestales es determinar la biomasa afectada. Esta información es vital para el análisis de impactos sobre el uso del suelo, hábitat, ecosistemas, etc. y ambiental en general. Existen varias formas para medir la biomasa de un área forestal, la mayoría están relacionadas con el contacto directo con la vegetación. Pero si la vegetación ha sido quemada como estimar su biomasa sin establecer contacto con ella. No obstante, de este contacto y la experimentación en campo han salido indicadores que permiten estimar de acuerdo al tipo de vegetación y el tamaño del área la cantidad de biomasa⁵.

Bajo este principio y utilizando metodologías relativamente recientes se pudo estimar dichos valores. Inicialmente se determinó el tipo de vegetación afectada por incendios forestales en la temporada 2017 lo que arrojó en un mapa para toda la región peninsular. La figura 7 muestra un fragmento de dicho mapa con la finalidad de observar mejor los diferentes tipos de vegetación afectada. El fragmento corresponde a la porción norte del estado de Campeche, cercano a su límite con el estado de Yucatán.

La vegetación afectada se agrupó en seis tipos generales y principales de la región acorde, además, a la metodología de estimación utilizada. Esta diferenciación se muestra en la tabla 3, así como sus porcentajes correspondientes. Obsérvese como la quema de biomasa tiene mayor actividad en las áreas de vegetación correspondientes a pastos y vegetación secundaria.

Tabla 3: Porcentaje Vegetación quemada según área y biomasa. Península de Yucatán. Temporada de incendios 2017.

	Área (Ha)	%	Biomasa Quemada (Tm)	%
Agrícola	33 380	25.8	767 739	6.2
Bosque	386	0.3	146 853	1.2
Pasto	39 378	30.4	1 000 207	8.0
Sabana	3053	2.4	21678	0.2
Selva	1996	1.5	532424	4.3
Vegetación secundaria	51378	39.7	9973453	80.2

⁵ El procedimiento de estimación de biomasa esta explicado en el capítulo 1, acápite Metodología.

La biomasa quemada se estimó a partir del tamaño de los incendios obtenido con las imágenes de satélites y el índice de carga y factor de combustión publicados por la Unión Europea de Geofísica (tabla 1). Los factores de combustión e índice de carga de biomasa están expresados en unidades de masas por hectáreas quemadas. De esta forma, al multiplicar ambos valores se obtiene la biomasa quemada.

El 80% de la biomasa quemada en la región es aportada por la vegetación secundaria. Este tipo de vegetación está relacionada con la que ocupa un espacio después de ser sometido a un disturbio natural o antrópico. Es decir la vegetación natural del lugar deja de existir por la ocurrencia de algún evento como huracán, la tala por expansión agrícola, etc. y es reemplazada por la vegetación secundaria.

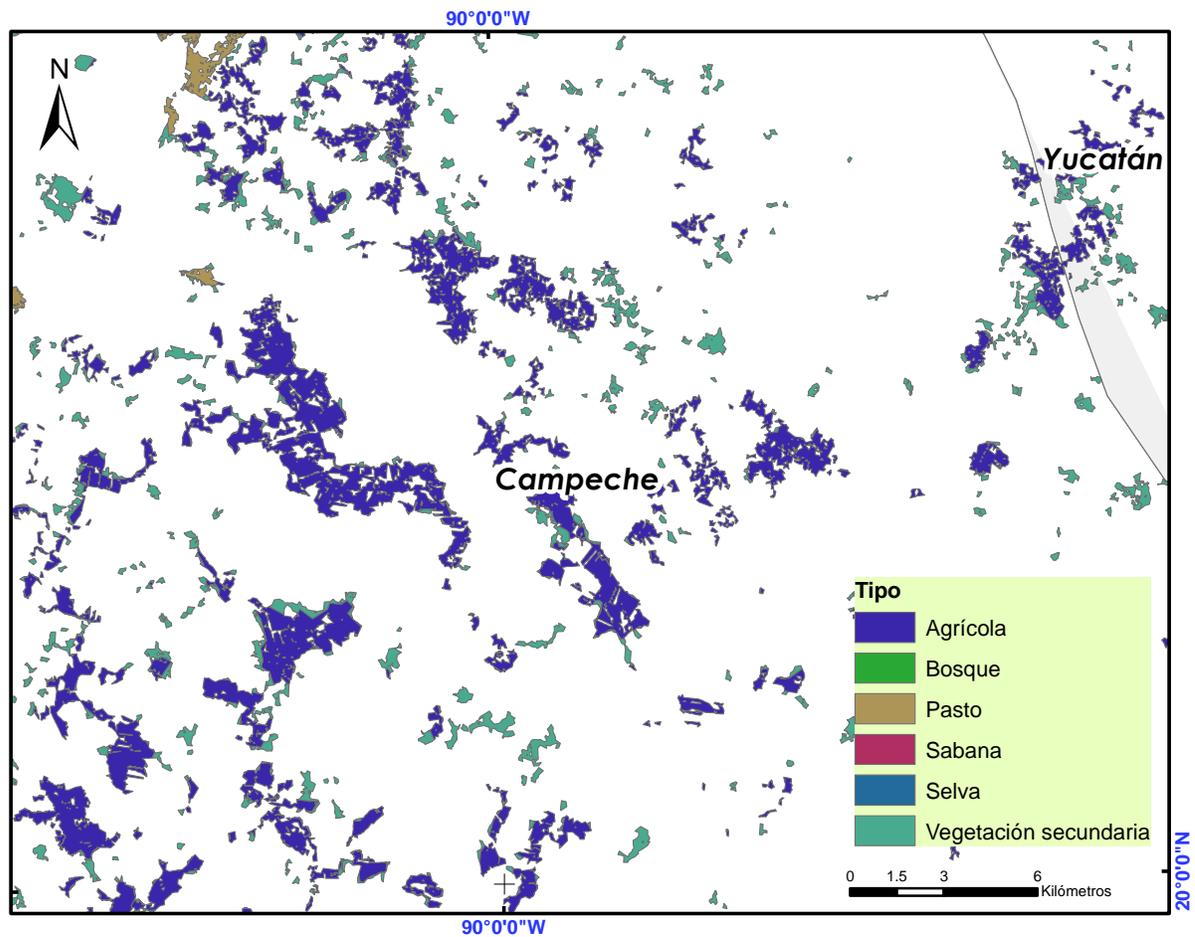


Figura 22: Vegetación quemada, temporada de incendios 2017, Península de Yucatán (fragmento).

Una particularidad de la vegetación secundaria quemada en la región es su distribución mayormente en los alrededores de las áreas agrícolas quemadas (ver figura 22). Esta característica indica que una de las vías de expansión de las tierras agrícolas es mediante la quema de vegetación. Además, indica que el tipo de incendio es controlado, de pequeña envergadura y extendido en el tiempo. Aspectos, estos, que son suficientes para que no sean considerados, por los organismos competentes, como incendios forestales.

Sin embargo, su aportación a la atmosfera en cuestiones de gases y material particulado es considerable pues cerca de 10 millones de toneladas, solo de vegetación secundaria, fueron quemadas en la temporada anterior. En total, según los cálculos estimados en este trabajo, la temporada de incendios 2017 devastó un aproximado de 12.4 millones de toneladas de biomasa.

CAPITULO 4: EMISIÓN DE GASES Y AEROSOLES EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

La biomasa, formada en mayor medida por carbono, al quemarse produce grandes cantidades de gases traza y partículas de aerosol que juegan un papel importante en la química atmosférica y el clima. Las emisiones de monóxido de carbono y metano por la quema de biomasa afectan la eficiencia de oxidación de la atmósfera al reaccionar con radicales hidroxilo, y las emisiones de óxido nítrico e hidrocarburos conducen a altas concentraciones de ozono en los trópicos durante la estación seca. También se producen grandes cantidades de partículas de humo, que pueden servir como núcleos de condensación de nubes. Por lo tanto, estas partículas pueden influir sustancialmente en las propiedades microfísicas y ópticas de la nube, un efecto que podría tener repercusiones para el presupuesto de radiación y el ciclo hidrológico en los trópicos. La quema generalizada también puede perturbar los ciclos biogeoquímicos, especialmente el del nitrógeno. (Crutzen & Andreae, 1990).

Es un hecho la influencia de los gases desprendidos del proceso de combustión en un incendio forestal. Aunque el cálculo de estos gases es bien complicado, dada la variedad de vegetación quemada y de gases emitidos; así como otros factores es posible estimar el cálculo y tener una aproximación de la magnitud del fenómeno.

La estimación de la cantidad de los gases emitidos por un incendio forestal está basadas en los factores de emisión. Estos factores han sido calculados bajo condiciones similares a las reales de un incendio o incluso en los propios incendios. Utilizando el tipo de vegetación quemada y la superficie afectada por el incendio es posible obtener un valor estimado de cada gas traza.

En este estudio se estimaron cinco gases y dos aerosoles, escogidos por ser de los que más influyen en el efecto invernadero y en la contaminación del aire respirable por los seres vivos, especialmente el hombre. Los gases analizados fueron Dióxido de Carbono (CO_2), Monóxido de Carbono (CO), Metano (CH_4), Dióxido de azufre (SO_2) y Óxidos de Nitrógeno (NO_x). Mientras que los aerosoles se relacionan con el Material Particulado (PM), específicamente PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$.

4.1. Estimación de gases y material particulado.

Los incendios producen aproximadamente la mitad de las emisiones de gases de efecto invernadero proveniente de la deforestación y un veinte por ciento de las emisiones totales originadas por actividad humana (Gallardo Lancho, 2009) de (Bowman et al. 2009). Cifras considerables para una actividad aparentemente inofensiva en la región peninsular. “inofensiva” pues la mayor parte de estos incendios están asociados a la actividad agrícola (como se analizó en el capítulo anterior) donde los daños son mínimos, pero las emisiones son las mismas.

El análisis en el capítulo anterior, arrojó cerca de 12.4 millones de megagramos (Mg) de biomasa quemadas en la pasada temporada de incendios. Obviamente, buena parte de esa masa quemada fue a parar a la atmosfera en forma de gases y aerosoles. La figura 23 muestra los resultados de la estimación hecha. La estimación de aerosoles se realizó utilizando la biomasa quemada (tabla 3), según tipo de vegetación y los factores de emisión publicados por la Unión Europea de Geofísica (tabla 2), también según tipo de vegetación quemada. Al multiplicar los valores de ambas tablas se obtiene la fracción de aerosol emitido por concepto de la combustión.

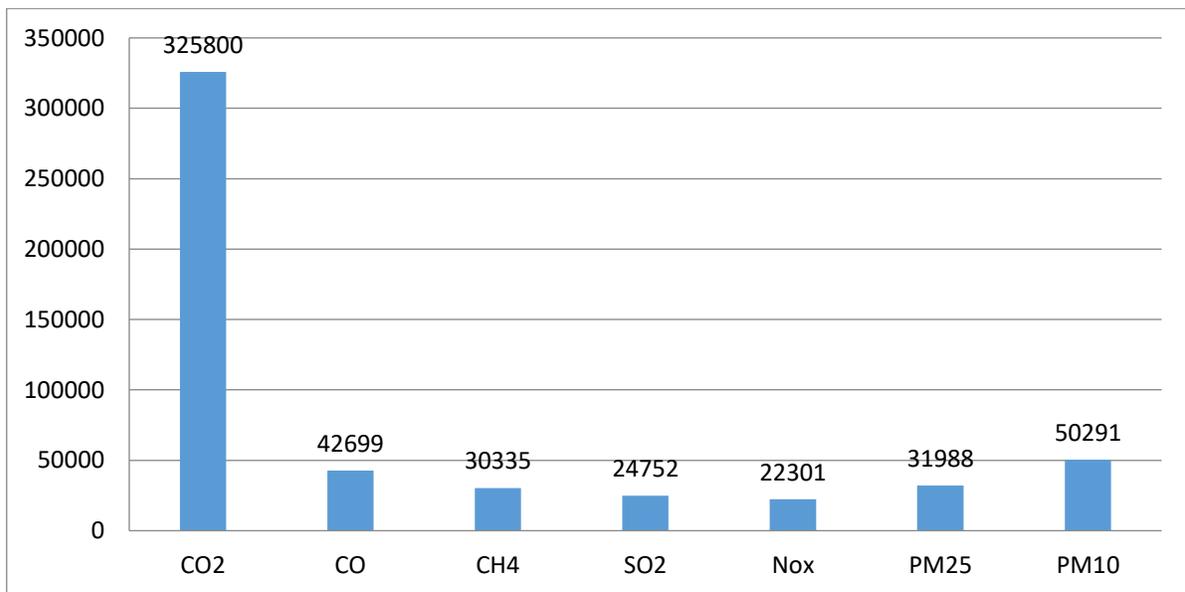


Figura 23: Emisiones (Mg) estimadas de gases y aerosoles (seleccionados) por incendios forestales. Península de Yucatán, temporada 2017.

Como ha de esperarse, la mayor emisión está en el CO₂, como resultado directo del proceso de combustión. Gas este que contribuye al calentamiento de la atmósfera y por consiguiente al reforzamiento del efecto invernadero; así como el CH₄. Cabe destacar además el aporte de decenas de miles de toneladas de partículas inferiores a 10 micrómetros de diámetro (PM₁₀ y PM_{2.5}) muy perjudicial para la salud humana y desencadenante de enfermedades degenerativas.

Tabla 4: Emisión estimada de gases y partículas (Mg), según tipo de vegetación. Península de Yucatán, temporada incendios 2017.

	Biomasa Quemada	CO₂	CO	CH₄	SO₂	NO_x	PM_{2.5}	PM₁₀
CULTIVOS	767 739	12 169	2 373	1 255	-	1 521	2 036	-
BOSQUE	146 853	4 160	506	376	309	267	382	663
PASTOS	1 000 207	10 904	3 553	1 753	2 286	1 271	2 209	2 224
SABANA	21 678	962	80	49	39	106	45	-
SELVA	532 424	15 082	1 834	1 363	1 121	970	1 384	2 402

En correspondencia con la magnitud de las áreas y la biomasa quemada por tipo de vegetación la mayor emisión de gases y partículas está dada por la vegetación de tipo secundaria y pastos. Le sigue las emisiones por quema de áreas de cultivos que unido a los dos tipos de vegetación, antes mencionados, suman cerca del 95% de las emisiones de gases y partículas a la atmósfera.

4.2. Dispersión de gases y aerosoles

Los gases y aerosoles emitidos de un incendio forestal no afectan solamente el lugar donde ocurre el incendio. Estos se van a desplazar hacia los alrededores del incendio en dependencia de las características meteorológicas del momento, la intensidad de la quema entre otros factores. Aunque no es objetivo del presente trabajo analizar los detalles de la transportación de estos gases si es necesario un análisis general de tal comportamiento. De esta forma se estaría evaluando la factibilidad de una modelación numérica y las zonas de la península donde estaría dirigida la modelación.

Al tener cartografiada las áreas quemadas durante la temporada de incendios 2017 y al observar una imagen de satélite correspondiente a algún momento de la temporada además de comprobar la correspondencia entre ambas se pueden

obtener otros resultados. El resultado de este análisis se muestra en la figura 24. Nótese como las áreas de mayor concentración de gases se localizan hacia el sur de la península, principalmente hacia el interior occidental del estado de Campeche. Por el contrario, las áreas de menor concentración de gases, se localizan hacia el norte de la región peninsular.

En la imagen de satélite puede observarse claramente las plumas de humo procedente de los incendios simultáneos ocurridos hacia el sur de la península. Es notable la diferencia entre el patrón de nubosidad del norte oriental con el patrón de humo del sur occidental. Además es visible el desgarre del humo en dirección sudeste coincidiendo con los viento predominante de la temporada. Es interesante el contraste entre patrones antes mencionados, indicando la presencia de situaciones complejas de circulación e inhibición de formación de nubes por la influencia de los incendios forestales.

Estos aspectos muestran que el transporte de gases producidos por los incendios puede alcanzar grandes extensiones de la península aun donde no están ocurriendo incendios. La modelación numérica de la dispersión de estos gases podría ayudar a entender este fenómeno observado en la imagen.

Otro aspecto significativo es el transporte de partículas con diámetros muy pequeños, conocidos como aerosoles. De capítulos anteriores se sabe que los incendios forestales generan aerosoles como material particulado. La imagen de satélite, también muestra presencia de aerosoles. Obsérvese la zona próxima a la costa occidental de la península y se notará el halo de aerosoles (más fácil de ver por el contraste con el agua del golfo). Estas partículas son de los contaminantes que más afectan la salud de las personas pues son partículas respirables y que el organismo no puede eliminar.

El estado de Quintana Roo es el menos afectado por la dispersión de los gases y aerosoles emitidos por la quema de biomasa en la península. En esto influye en mayor medida la característica climática de predominio de vientos de región Este – Sudeste durante la temporada de incendios. Estos vientos favorecerán la dispersión de los incendios y sus gases a la región Oeste – Noroeste. A saber del capítulo 2,

estos vientos de la temporada de incendios (primavera) no son fuertes con velocidades entre 3 y 20 km/h. factor este que unido a la brisa de la costa occidental de la península harán que los gases se mantengan sobre tierra, al menos los que están más cercanos a la superficie.



*Figura 24: Sensor VIIRS del día 25 de abril de 2017.
(https://eoimages.gsfc.nasa.gov/images/imagerecords/90000/90142/yucatan_vir_2017115_geo.tif)*

La figura 25 muestra el mismo comportamiento de la dispersión de los gases y partículas emitidos por incendios forestales simultáneos en la Península de Yucatán. Sin embargo, corresponde a días similares a la imagen anterior, pero 11 años antes. Ambas imágenes muestran el hecho de que los incendios forestales emiten y dispersan considerables cantidades de gases y aerosoles por gran parte

de la península sin que parezca importar a las autoridades sanitarias ni gubernamentales. La coincidencia de patrones de dispersión en años tan diferentes, refuerza las evidencias que los incendios en la región, son controlados y provocados por el hombre más que naturales.



Figura 25: Sensor MODIS del día 6 de mayo 2006.
https://eoimages.gsfc.nasa.gov/images/imagerecords/16000/16483/yucatan_amo_2006126_lrg.jpg

CAPITULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La principal problemática de este trabajo ha sido la estimación, con cierta precisión, de las áreas quemadas por incendios forestales. Un problema que ha estado presente en varias investigaciones anteriores que han estimado las emisiones de gases por incendios forestales. *“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.”* (Bautista Vicente, 2015).

La metodología propuesta en este trabajo resuelve esa problemática y permite obtener con una alta precisión las áreas quemadas por incendios forestales. Estimar el área quemada con cierta precisión garantiza mejor aproximación a la realidad en la estimación de las emisiones y la biomasa quemada tras un incendio forestal. Además que puede ser utilizada en cualquier parte del territorio mexicano e incluso en cualquier región del planeta afectada por esta problemática y con disponibilidad de imágenes satelitales de alta resolución espacial. Es muy útil para determinar el impacto de los incendios forestales en aquellas zonas de difícil acceso y que tienen alta ocurrencia de incendios como es el caso de la Sierra Madre, en México.

Otro aspecto de relevancia al aplicar esta metodología es la cuantificación de áreas y emisiones que no se documentan por las fuentes oficiales porque constituyen incendios controlados, como es el caso de los incendios asociados a actividades agrícolas.

De forma general, el trabajo, arrojó cuatro resultados principales aunque la tarea y objetivo fundamental fue estimar las áreas quemadas por incendios forestales. Se

pudo además, identificar el tipo de vegetación afectada por los incendios, como segundo resultado. En tercer lugar, aplicando metodologías de estimación por carga de biomasa por unidad de área se pudo estimar la biomasa quemada. A partir de esta biomasa quemada y el uso de factores de emisión se pudo estimar la emisión de gases efecto invernadero y trazas contaminantes como cuarto resultado. Estos tres últimos resultados no se hubiesen alcanzado de no ser por la obtención de las áreas quemadas.

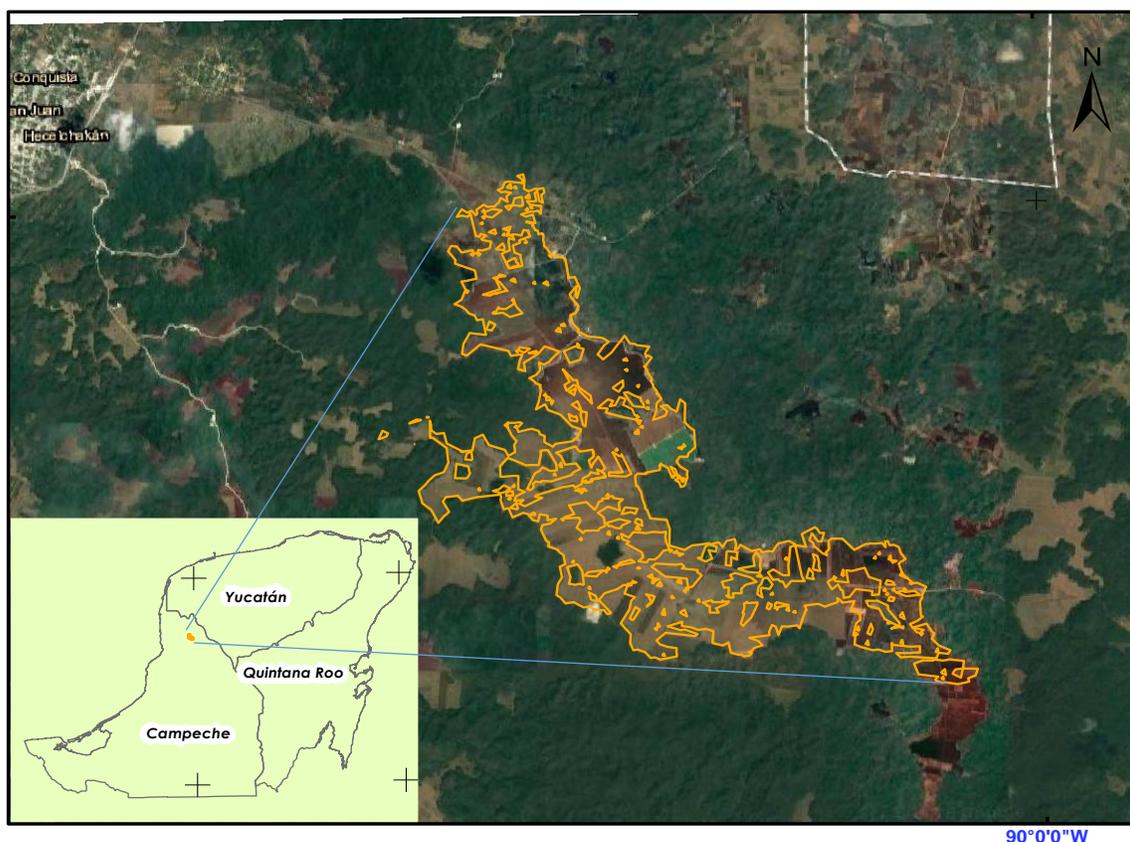


Figura 26: Superposición de área quemada con imagen Google Earth.

En una primera aproximación por determinar el nivel de precisión de la metodología propuesta para la estimación de las áreas quemadas se utilizó como referencia la mayor área quemada durante la temporada de incendios. Esta área se representa en la figura 26, pero superpuesta en una imagen de alta resolución obtenida del Google Earth. Véase como coinciden las formas del área quemada y las de cultivos,

mostradas en la imagen de fondo. Aspecto que demuestra la ocurrencia de incendios controlados y la precisión de la metodología utilizada.

Las áreas quemadas estimadas por incendios forestales en la Península de Yucatán, durante la temporada de incendios de 2017, representan cerca del 1 % de la superficie total de la península. Además de ser diez veces más que las áreas documentadas por CONAFOR. La primera cifra es razonablemente creíble cuando se sabe que ocurren muchísimos incendios en la región y que no son de grandes magnitudes. La segunda cifra es similar a planteamientos realizados por otras investigaciones al exponer que CONAFOR solo documenta el 10 % de los incendios ocurridos en el país. Ambos valores permiten inferir que el procedimiento realizado no está tan alejado de la realidad.

Asumiendo que cada polígono cartografiado como área quemada se debe mínimo a un incendio podría decirse que en la temporada de incendios ocurrieron mínimos 10 566 incendios, el 67 % de ellos en el estado de Campeche. Teniendo en cuenta la forma geométrica de las áreas quemadas se puede observar que predominan los lados rectos, como muestra la figura 27.

Esta característica es evidencia de la idea expuesta anteriormente referida al control de los incendios asociados a la actividad agrícola. También es posible observar como alrededor de las áreas agrícolas que fueron quemadas aparecen áreas con otro uso de suelo diferente al agrícola. Lo mismo ocurre con las áreas dedicadas a pasto y fueron quemadas, a su paso queman otras áreas limítrofes. Este hecho es evidencia del uso del incendio como vía de expansión tanto de las tierras agrícolas como de pastos. Las áreas quemadas están asociadas fundamentalmente a vegetación de tipo secundaria con el 56 % de ocurrencia de incendios. Le siguen en orden de incidencia las áreas de pastos, cultivos, selva, sabana y bosque.

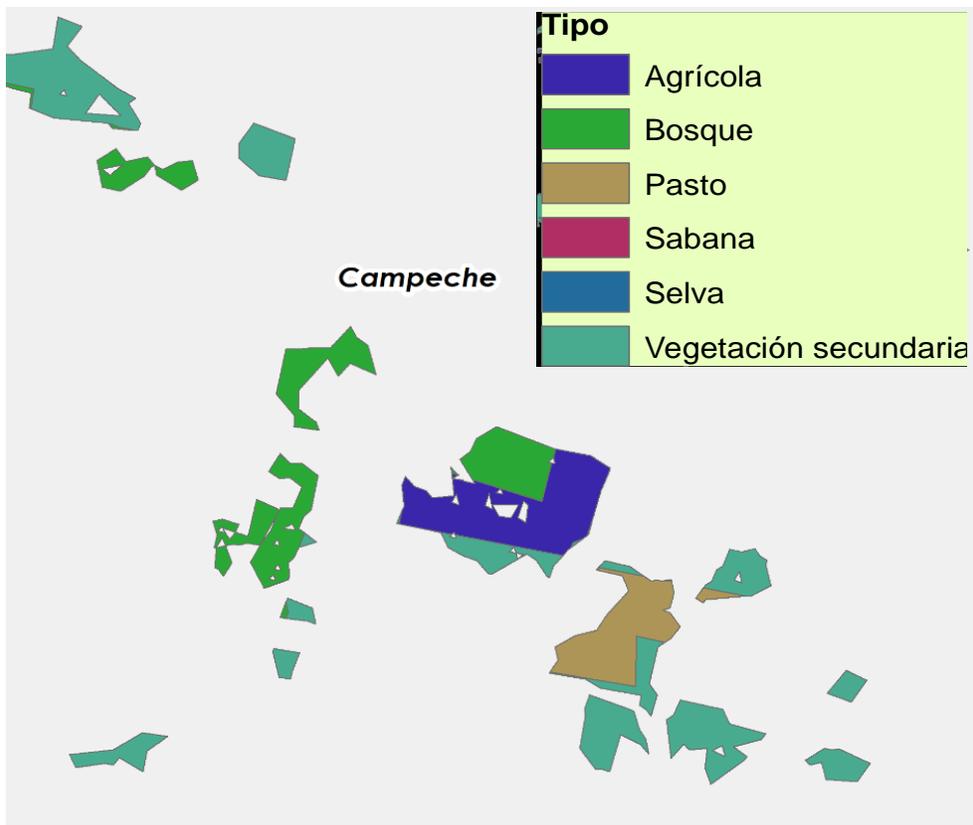


Figura 27: Geometría característica de la vegetación quemada.

El otro resultado significativo del presente trabajo fue la estimación de gases y partículas. En los cuatro meses que dura la temporada de incendios se emitieron a la atmosfera poco más de 129 mil toneladas de gases y partículas contaminantes; así como casi 399 mil toneladas de gases efecto invernadero. Estas emisiones solo como parte del proceso de quema de biomasa por incendios forestales. Una fracción considerable de estas emisiones se queda en superficie y se dispersa con la ayuda de las variables meteorológicas hasta lugares aparentemente distantes de los incendios o donde ni siquiera ocurren estos.

De esta forma el aire que respiran las personas que viven y las que visitan la Península de Yucatán durante los meses de febrero a mayo, cada año, está mezclado con gases y partículas contaminantes. Según la distribución de los incendios en la península, toda la región occidental peninsular es la mayor expuesta a estos gases y partículas. Exponerse de forma continuada a estos gases y partículas contaminantes puede desencadenar serios problemas de salud.

Problemas fundamentalmente vinculados a Infecciones Respiratorias Agudas (IRA), cáncer de varios tipos y otros padecimientos a largo plazo.

De hecho el estado de Yucatán aparece, en reiteradas ocasiones en los Informes Semanales para la Vigilancia Epidemiológica de Infecciones Respiratorias Agudas ofrecidos por la Secretaría de Salud, como una de las entidades federativas con mayor incidencia de casos hospitalarios por IRA. Debería ser de suma importancia para las autoridades de salud pública locales la relación que puede existir entre la alta incidencia de incendios, emisiones de gases y partículas nocivas y la salud de las personas. El material particulado como PM₁₀ y PM_{2.5}, emitido por la quema de biomasa, formado por micropartículas son capaces de entrar al cuerpo por las vías respiratorias, poros de la piel, etc. Estas micropartículas una vez alojadas en el cuerpo ya no salen y se alojan formando tumores o envenenando lentamente el sistema inmune. Sin lugar a dudas, es una temática de interés para las autoridades sanitarias como gubernamentales de la península. Los incendios son evitables y con ello la emisión de esas centenas de miles de toneladas al año de gases contaminantes. Basta con dejar de permitir la quema de biomasa controlada asociada a la actividad agrícola.

Los resultados aquí alcanzados y expuestos son un tanto difíciles de validar, pues no se puede cuantificar “a mano” cada hectárea de tierra quemada. No obstante, al utilizarse imágenes de alta resolución es fácil comprobar en el espectro visible el cambio de color de la vegetación pasando de verde a marrón o negro. De hecho es la forma de validar las metodologías de detección de incendios y áreas quemadas utilizadas por sensores MODIS y otros de baja resolución espacial.

Al ser el primer trabajo en intentar cuantificar las áreas quemadas de la Península de Yucatán no hay referencias anteriores para comparar resultados. Como es sabido que la CONAFOR no documenta todos los incendios ocurridos y al compararlos con estos resultados siempre serán inferiores. No obstante trabajos, sobre la temática, dedicados a todo el país, como el realizado por Bautista Vicente en 2015, arrojan a la península como una de las zonas de mayor frecuencia de incendios y de mayores emisiones de gases efecto invernadero.

Tabla 5: Emisiones (Mg) estimadas según gases y Estado.

GASES Y PARTICULAS	YUCATÁN		QUINTANA ROO	
	Estimado	Inventario GEI	Estimado	Inventario GEI
CO ₂	38.8	1334.3	12.6	373
CO	5.7	9.45	1.6	1.05
CH ₄	3.8	42.94	1.1	126
NO _x	2.8	0.27	0.8	0

Una alternativa de aproximación a la veracidad de los resultados aquí mostrados sería compararlos con otras fuentes de estimación. En este caso con el inventario de gases efecto invernadero realizado por el Programa Estatal de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero del gobierno de los estados de Yucatán y Quintana Roo. Aunque la metodología aplicada en ambos casos es diferente se espera que los datos estimados por este trabajo estén contenidos en los estimados por el inventario. El inventario de GEI está dividido en categorías de análisis de emisiones, por lo que se utilizó las estimaciones hechas en el sector agrícola y de cambio y uso de suelo. Ver tabla 5.

La tabla muestra las emisiones estimada en este trabajo dentro de la columna “estimado” y las emisiones estimadas por el inventario GEI con la columna de igual nombre. Obsérvese como efectivamente los valores estimados son fracciones de los estimados por el inventario, pues estos recogen toda la actividad agrícola y forestal. Además son fracciones pequeñas lo que deja ver que no ha habido una sobrevaloración de la estimación aquí realizada. Obviamente no es una validación y no se puede decir con certeza que estas fueron realmente las emisiones, pero basado en esta comparación y el hecho de que las imágenes fueron de alta resolución y la metodología de estimación, utilizada, esta validada podría decirse que la estimación es fiable.

Esta investigación deja abierta la puerta a futuras líneas de investigación bajo la tesis de qué pasa con todas estas emisiones, cómo se dispersan y transportan. Qué porcentaje de la población peninsular está localizada en las zonas de mayor influencia de estas emisiones y por tanto están expuestas a dañar su salud. De ahí

que sea necesario continuar este trabajo con la modelación numérica tanto de la propagación de incendios como la dispersión de contaminantes.

Finalmente cabe mencionar que alcanzar estos resultados conllevó a algunas dificultades y limitantes. Mismas que pueden ser de utilidad para otros autores que intenten reproducir la metodología aquí expuesta. Las dificultades y limitantes están más bien asociadas al procesamiento digital y de análisis espacial de las imágenes así como su disponibilidad. Esto principalmente a la capacidad computacional necesaria y el tiempo de procesado, requiere equipos de última generación. Las imágenes de alta resolución tienen baja resolución temporal que no garantizan coincidir imagen con incendio. Por último, la nubosidad presente en la imagen afecta la información debajo de estas, se pierde, de ahí la necesidad de imágenes limpias de nubes.

CONCLUSIONES

- El área devastada por un incendio forestal puede ser estimada utilizando imágenes de satélites de alta resolución espacial, a partir de técnicas geomáticas y análisis geoespacial.
- La temporada de incendios forestales 2017, en la Península de Yucatán, dejó un estimado mínimo de 10 566 incendios y un área devastada cercana a las 130 mil hectáreas quemadas, casi 10 veces más que las documentadas oficialmente.
- La mayor parte de los incendios forestales y las áreas quemadas están asociados a la actividad agrícola y pastoril. La forma de las áreas quemadas guarda gran similitud con las parcelas agrícolas y pasto cultivado. Los incendios son del tipo controlado que no se documentan por CONAFOR.
- El 74 % de las áreas quemadas ocurrieron en el Estado de Campeche.
- El 40 % de las áreas quemadas correspondieron a vegetación secundaria, seguido de las áreas dedicadas a pasto y las dedicadas a cultivos.
- La temporada de incendios 2017, en Yucatán, dejó un estimado de 12.4 Tg de biomasa quemada.
- En los cuatro meses que dura la temporada de incendios se emitieron a la atmosfera poco más de 129 mil toneladas de gases y partículas contaminantes; así como casi 399 mil toneladas de gases efecto invernadero.

RECOMENDACIONES

- Continuar investigando la temática de los incendios forestales en la Península de Yucatán, pero orientada a la modelación numérica. Con tantos incendios y toneladas de emisión de gases contaminantes resulta necesario saber su propagación y dispersión, así como el porcentaje de población expuesta a este riesgo.

- Poner los resultados aquí expuestos en manos de las autoridades locales, tanto gubernamentales como sanitarias. Es conocido la autorización de quema de campos de cultivos y pastos, en la región, con fines de preparación de tierras para la temporada de siembras.

- La metodología aplicada, en este trabajo, puede ser utilizada en cualquiera de las muchas regiones del país que presentan alta frecuencia de incendios. Es de mucho valor para aquellas zonas intrincadas y de difícil acceso dentro de la compleja orografía mexicana. Además de poder expandirse a otras regiones de Centroamérica afectadas por esta misma situación y no cuentan con herramientas de medición.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, R. L., & Domínguez, S. R. (2016). Deforestación en la Península de Yucatán, los retos que enfrentar. *Madera y Bosques*, 5(2), 3-17.
doi:<https://doi.org/10.21829/myb.1999.521344>.
- Aguirre Salado, C. A., Valdez Lazalde, J. R., & Ángeles Pérez, G. (2011). MAPEO DEL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR Y COBERTURA ARBÓREA MEDIANTE FOTOGRAFÍA HEMISFÉRICA Y DATOS SPOT 5 HRG: REGRESIÓN Y K-NN. *Agrociencia*, 45, 105-119.
- Akagi, S. K., & Otros. (2011). Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models. *Atmospheric Chemistry Physics*, 11, 4039–4072,.
doi:10.5194/acp-11-4039-2011
- Andreae, M. O., & Metlet, P. (2001). Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *GLOBAL BIOGEOCHEMICAL CYCLES*, 15(4), 955-966. Obtenido de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2000GB001382>
- Aquino, E. B., Núñez, X. C., & Ruiz, L. V. (2017). *Emisiones de CO2 por incendios forestales en la Ciudad de México de 2003 a 2014*. VIII Simposio Internacional del Carbono en México 2017. México: Inédito.
- Archer, D. W., & Johnson F., J. M. (2012). Evaluating Local Crop Residue Biomass Supply: Economic and Environmental Impacts. *Bioenerg. Res.*, 5, 699-712. doi:DOI 10.1007/s12155-012-9178-2
- Badarinath, K., Kharol, S. K., & Sharma, A. R. (2009). Long-range transport of aerosols from agriculture crop residue burning in IndoGangetic Plains-A study using LIDAR, ground measurement sand satellite data. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 112-120.
- Baños Ramírez, O., & Castañeda Navarrete, J. (mayo de 2007). Las tres economías de una región ganadora: la península de Yucatán, 1970 - 2004. *comercio exterior*, 57(5), 392-404.

- Bautista, F., & Palacio, G. (2005). *Caracterización y Manejo de los Suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones Agropecuarias, Forestales y Ambientales*. Campeche, Campeche, México: Centro EPOMEX de la Universidad Autónoma de Campeche.
- Blondel B, M., & Fernandez C, I. (2012). Efectos de la fragmentación del paisaje en el tamaño y frecuencia de incendios forestales en la zona central de Chile. *Conservación Ambiental*, 2(1), 7-17. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/243962903>
- Bracho, L. R., & Bravo, V. G. (2006). Las partículas suspendidas, aeropartículas o aerosoles: ¿hacen daño a la salud? ¿podemos hacer algo? *Gaceta Oficial*, 69, 29-44.
- CACHIER, H., LIOUSSE, C., & BUAT-MENARD, P. (1995). Particulate Content of Savanna Fire Emissions. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 22, 123-148.
- CAO, G., ZHANG, X., GONG, S., & ZHENG, F. (2008). Investigation on emission factors of particulate matter and gaseous pollutants from crop residue burning. *Journal of Environmental Sciences*, 50-55.
- Carmona, R. E. (2016). *Estimación de la biomasa forestal de la Sierra San Miguelito por medio de imágenes satelitales*. IPICYT, Geociencias Aplicadas. San Luis Potosí: inedito.
- Chave, J., Condit, R., Aguilar, S., Hernández, A., Lao, S., & Perez, R. (2004). Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *The Royal Society*, 409-420. Obtenido de <http://rstb.royalsocietypublishing.org>
- CHUVIECO, E., MARTÍN, M. P., & VENTURA, G. (2015). EVALUACIÓN DE IMÁGENES NOAA-AVHRR Y TERRA-MODIS PARA CARTOGRAFÍA REGIONAL DE ÁREAS QUEMADAS. *Revista Argentina de Produccion animal*, 2-10. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/255655097>
- Comisión Nacional Forestal. (2010). *Incendios Forestales: Guía paractica para comunicadores* (Tercera ed.). Zapopan, Jalisco, México: CONAFOR.
- Crutzen, P. J., & Andreae, M. O. (21 de Diciembre de 1990). Biomass Burning in the Tropics: Impact on Atmospheric Chemistry and Biogeochemical Cycles. *Science*, 250, 1669-1678. doi:10.1126/science.250.4988.1669

- Cruz López, M. (2018). Una aproximación para estimar la eficiencia del quemado usando productos satelitales. *GeoFocus*(21), 119-143. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.21138/GF.562>
- Di Bella, C. M., & otros. (1999). *MONITOREO Y DETERMINACION DEL RIESGO DE INCENDIOS FORESTALES UTILIZANDO IMAGENES NOAA-AVHRR EN LA REGION PATAGONICA ARGENTINA*. VIII Congreso Nacional de Teledetección. Albacete, España. Albacete: VIII Congreso Nacional de Teledetección.
- Dos Santos, J. R., Pardi Lacruz, M. S., Spinelli de Araujo, L., & Magalhães Xaud, H. A. (1998). EL PROCESO DE QUEMA DE BIOMASA DE BOSQUE TROPICAL Y DE SABANAS EN LA AMAZONIA BRASILEIRA: EXPERIENCIAS DE MONITOREO CON DATOS ÓPTICOS Y DE MICROONDAS. *Serie Geográfica: Incendios Forestales*, 7, 97-108.
- DRAKE, J. B., & OTROS. (2003). Above-ground biomass estimation in closed canopy Neotropical forests using lidar remote sensing: factors affecting the generality of relationships. *Global Ecology & Biogeography*, 12, 147-159. Obtenido de <http://www.blackwellpublishing.com/journals/geb>
- Echalar, F., Gaudichet, A., Cachier, H., & Artaxo, P. (1995). Aerosol emissions by tropical forest and savanna biomass burning: characteristic trace elements and fluxes. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, 22(22), 3039-3042. doi:0094-8534/95/95GL
- Edwards, A. C., Russell-Smith, J., & Maier, S. W. (2018). A comparison and validation of satellite-derived fire severity mapping techniques in fire prone north Australian savannas: Extreme fires and tree stem mortality. *Remote Sensing of Environment*, 206, 287–299. doi:10.1016/j.rse.2017.12.038
- Escandon calderón, J., & Otros. (1999). Evaluación de dos métodos para la estimación de biomasa arbórea a través de datos LANDSAT TM en Jusnajib La Laguna, Chiapas, México: estudio de caso. *Investigaciones Geográficas*, 71-84.
- Ferek, R. J., Reid, J. S., & Hobbs, P. V. (1998). Emission factors of hydrocarbons, halocarbons, trace gases and particles from biomass burning in Brazil. *JOURNAL*

OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 103(D24), 32,107-32,118. doi:0148-0227/9 8/9
8JD-0069 2

- Fernández Manso, A., Fernández Manso, O., & Quintano, C. (2016). SENTINEL-2A red-edge spectral indices suitability for discriminating burn severity. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 50, 170-175.
doi:10.1016/j.jag.2016.03.005
- Flores, J., & Espejel, I. (1994). *Tipos de Vegetación de la Península de Yucatán*. Merida, Yucatán: Universidad Autónoma de Yucatán.
- Francois, M., & otros. (2015). Monitoring land-use change by combining participatory land-use maps with standard remote sensing techniques: Showcase from a remote forest catchment on Mindanao, Philippines. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 69-82.
- Galidaki, G., & Otros. (2017). Vegetation biomass estimation with remote sensing: focus on forest and other wooded land over the Mediterranean ecosystem. *International Journal of Remote Sensing*, 38(07), 1940–1966.
doi:10.1080/01431161.2016.1266113
- Gallardo Lancho, J. (2009). *Emisiones de gases con efecto invernadero en ecosistemas iberoamericanos*. Salamanca: Researchgate. Obtenido de
<https://www.researchgate.net/publication/235981394/download>
- Gang, C., Metz, M. R., Rizzo, D. M., Dillon, W. W., & Meentemeyer, R. K. (2015). Object-based assessment of burn severity in diseased forests using high-spatial and high-spectral resolution MASTER airborne imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 102, 38-47.
doi:10.1016/j.isprsjprs.2015.01.004
- García, B. L. (2013). *Comparativa de índices espectrales aplicados a través de imágenes Modis*. Cataluña: inedito.
- Giglio, L., Randerson, J. T., & van der Werf, G. R. (2013). Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth-generation global fire emissions database

- (GFED4). *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH: BIOGEOSCIENCES*, 118, 317–328. doi:10.1002/jgrg.20042
- Gobierno de Quintana Roo. (2010). *INVENTARIO ESTATAL DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO QUINTANA ROO 2010*. Gobierno de Quintana Roo, Grupo de Ordenamiento Territorial. Chetumal: Inédito.
- Guoliang, C., & otros. (2008). Investigation on emission factors of particulate matter and gaseous pollutants from crop residue burning. *Journal of Environmental Sciences*, 20, 50-55.
- Haysa, M. D., Fineb, P. M., Gerona, C. D., Kleemanc, M. J., & Gullett, B. K. (2005). Open burning of agricultural biomass: Physical and chemical properties of particle-phase emissions. *Atmospheric Environment*, 39, 6747–6764. doi:10.1016/j.atmosenv.2005.07.072
- Herráez, D. P. (2013). *Asimilación de datos en un modelo de incendios forestales e integración en GIS*. universidad de salamanca, Escuela Politécnica Superior de Ávila. Salamanca: inedito. Obtenido de https://gredos.usal.es/jspui/bitstream/10366/122173/1/TFM_PrietoHerraezD_Asimilaciondedatos.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Campeche 2017*. Mexico: INEGI.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Quintana Roo 2017*. Mexico: INEGI.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2017). *Anuario Estadístico y Geográfico de Yucatán 2017*. México: INEGI.
- Janhäll, S., Andreae, M. O., & Pöschl, U. (2010). Biomass burning aerosol emissions from vegetation fires: particle number and mass emission factors and size distributions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 1429-1437. Obtenido de www.atmos-chem-phys.net/10/1427/2010/

- Joao, M. N., & Otros. (2003). An estimate of the area burned in southern Africa during the 2000 dry season using SPOT-VEGETATION satellite data. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 108(D13), 84-98. doi:10.1029/2002JD002320
- João, T., João, G., Bruno, M., & João, H. (2018). Indicator-based assessment of post-fire recovery dynamics using satellite NDVI time-series. *Ecological Indicators*, 89, 199-212. doi:10.1016/j.ecolind.2018.02.008
- KAUFMAN, Y. J., TUCKER, C. J., & FUNG, I. (1990). Remote Sensing of Biomass Burning in the Tropics. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 95(D7), 9927-9939.
- Levine, J. S. (11 de septiembre de 1990). Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic and Biospheric Implications. *EOS*, 1075-1077.
- López, K. M. (2009). *Monitoreo y seguimiento de incendios forestales usando tecnología satelital*. Instituto Nacional politecnico ,UPIBI. Mexico, D.F.: inedito.
- Magaña, V., Amador, J., & Medina, S. (1999). The Midsummer Drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate, American Meteorological*, 12(6), 1577-1588.
- Manso Jimenez, R. W. (2001). EMISIONES DE GASES Y PARTÍCULAS PRODUCTO DE LOS INCENDIOS FORESTALES EN CUBA ENTRE 1989 Y 1999. *SITIO ARGENTINO DE PRODUCCIÓN ANIMAL*, 10.
- Márdero, S. N. (2012). Sequías en el sur de la península de Yucatán: análisis de la variabilidad anual y estacional de la precipitación. *Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 19-33. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112012000200003&lng=es&tlng=es.
- Márdero, S., & otros. (2012). Sequías en el sur de la península de Yucatán: análisis de la variabilidad anual y estacional de la precipitación. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*.(78), 19-33.
- Medina, L. P. (2015). *Modelo matemático - numérico para simular la propagación de incendios forestales*. San Luis Potosí: Inédito.

- Mota, B., & Woostera, M. J. (2018). A new top-down approach for directly estimating biomass burning emissions and fuel consumption rates and totals from geostationary satellite fire radiative power (FRP). *Remote Sensing of Environment*, 206, 45-62. doi:10.1016/j.rse.2017.12.016
- Muñoz, C., Acevedo, P., Salvo, S., Fagalde, G., & Vargas, F. (2007). Detección de incendios forestales utilizando imágenes NOAA/16-LAC en la región de la Araucanía, Chile. *BOSQUE*, 28(2), 119-128.
- Pascual Ramírez, F., Paz Pellat, F., Martínez Menes, M., Palacios Vélez, E., Mejía Sáenz, E., & Rubio Granados, E. (2010). CLASIFICADOR GENÉRICO DE OBJETOS EN IMÁGENES AVHRR. *TERRA LATINOAMERICANA*, 28(1), 1-13. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v28n1/v28n1a1.pdf>
- Paz Pellat, F., & otros. (2007). DISEÑO DE UN ÍNDICE ESPECTRAL DE LA VEGETACIÓN: NDVIcp. *Agrociencia*, 41, 539-554.
- Pompa García, M., & Hernández González, P. (2012). Determinación de la tendencia espacial de los puntos de calor como estrategia para monitorear los incendios forestales en Durango, México. *Bosque*, 33(1), 63-68. doi:10.4067/S0717-92002012000100007
- Prieto Herráez, D. (2013). *Asimilación de datos en un modelo de incendios forestales e integración en GIS*. Universidad de Salamanca, ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ÁVILA. Salamanca: Inédito.
- Programa Mexicano del Carbono A.C. (2013). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: síntesis a 2013*. (F. P. Pellat, J. W. González, M. Bazan, & V. Saynes, Edits.) Texcoco, Mexico, México: Programa Mexicano del Carbono.
- Ramírez, M. d. (2012). *Cartografía de riesgo de incendios forestales aplicando sensores remotos y SIG*. IPICYT, Geociencias Aplicadas. San Luis potosí: Inédito.
- Randerson, & otros. (2012). Global burned area and biomass burning emissions from small fires. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 117, 23. doi:10.1029/2012JG002128

- Reid, J. S., Koppmann, R., Eck, T. F., & Eleuterio, D. P. (2005). A review of biomass burning emissions part II: intensive physical properties of biomass burning particles. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5, 799–825. Obtenido de www.atmos-chem-phys.org/acp/5/799/
- Ressl, R., & Cruz, I. (2011). Detección y monitoreo de incendios forestales mediante imágenes de satélites. *CONABIO, Biodiversitas*, 12-13.
- Sanabria, D. V. (2016). *Dinámica del paisaje en áreas afectadas por incendios forestales en el bosque tropical seco del Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica*. Universidad Estatal a Distancia, Ciencias exactas y naturales. San José, Costa Rica: Inédito.
- Streets, D. G., & Yarber, K. F. (2003). Biomass burning in Asia: Annual and seasonal estimates and atmospheric emissions. *GLOBAL BIOGEOCHEMICAL CYCLES*, 17(4), 1-20.
- Tutmez, B., Ozdogan, M. G., & Boran, A. (2018). Mapping forest fires by nonparametric clustering analysis. *Journal of Forestry Research*, 29(1), 177-185. doi:10.1007/s11676-017-0417-4
- van der Werf, G. R., & otros. (2017). Global fire emissions estimates during 1997–2016. *Earth Syst. Sci. Data*, 9, 697-720. doi:10.5194/essd-9-697-2017
- Vicente, F. S. (2015). *Emisiones Totales Anuales de CO2 por Incendios Forestales en el Periodo 1999-2010 en México y Estimación de Índice de Riesgo*. IPICYT, Geociencias Aplicadas. San Luis Potosí: Inédito.
- YAMALLEL, J. I., & otros. (2013). Emisión de gases de efecto invernadero derivadas de incendios forestales de 2000-2011 en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey. *CIENCIA UANL*, 16(62), 68-75. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/236620274>
- Zhu, C., Kobayashi, H., Kanaya, Y., & Saito, M. (2017). Size-dependent validation of MODIS MCD64A1 burned area over six vegetation types in boreal Eurasia: Large underestimation in croplands. *Scientific Reports*, 8. doi:10.1038/s41598-017-03739-0