



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**Propiedades ópticas de los aerosoles producidos por la quema de
biomasa en la región del sureste de México**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Licenciada en Ciencias de la Tierra

P R E S E N T A :

Claudia Lizeth Florean Cruz



DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Giovanni Alberto Carabalí Sandoval

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Nombre del alumno: Claudia Lizeth Florean Cruz
Correo electrónico: lizeth_florean@ciencias.unam.mx
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Licenciatura en Ciencias de la Tierra
Número de cuenta: 310103987
Tutor: Dr. Giovanni Alberto Carabalí Sandoval

Jurado:

Presidente: Dr. Fernando García García
Vocal: Dra. Claudia Inés Rivera Cárdenas
Secretario: Dr. Giovanni Alberto Carabalí Sandoval
Suplente: Dr. Harry Alvarez Ospina
Suplente: Dr. David Riveros Rosas

Agradecimientos

A mis padres por siempre estar ahí para mí y apoyarme en las decisiones que he tomado, por todo el esfuerzo que hacen día a día para darme lo mejor y principalmente por todo el amor, los amo mucho.

A mis hermanos por enseñarme de que trata la vida y darme lo más bonito de este mundo, la música y los libros, gracias por guiarme y darme la educación sentimental que necesito todos los días.

A Vane y Dolly por ser mi apoyo emocional y estar para mí siempre que lo necesito gracias por ser mis amigas incondicionales y sobre todo por quererme tanto.

A mis amigos y compañeros, gracias por compartir un pedacito de su vida y conocimientos conmigo, por creer en mí y motivarme, ustedes siempre han hecho el camino mucho más divertido, los quiero un montón.

A Giovanni por tenerme la paciencia y darme la oportunidad de trabajar en este proyecto, muchas gracias por todo el apoyo.

A mis sinodales: Fernando, Claudia, Harry y David por su tiempo y sus consejos para poder concluir este trabajo.

Por último, a la Facultad de Ciencias, el Centro de Ciencias de la Atmósfera, el Instituto de Geofísica y a el Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica UNAM-DGAPA-PAPIIT (proyecto IA102116) por darme las herramientas necesarias para realizar este trabajo, gracias infinitas.

*“Soy de donde haya alguien que sonría, que me de la mano, que me bese.
Soy de donde son los que resisten, sobreviven, los que se quitan un
pedazo de pan de la boca para dárselo al otro. De allí soy. Allí me
encuentro.”*

Benito Taibo

Índice general

Lista de abreviaturas y acrónimos	III
Índice de figuras	IV
Índice de tablas	VI
Objetivo	1
1 Introducción	1
1.1 Marco teórico	2
1.2 Los aerosoles y sus fuentes de emisión	2
1.3 Propiedades físicas y químicas de partículas atmosféricas	3
1.3.1 El tamaño de las partículas	3
1.3.2 Composición química de los aerosoles	4
1.3.3 Quema de biomasa	5
1.3.4 Carbono Negro	5
1.4 Propiedades ópticas de los aerosoles atmosféricos	6
1.4.1 Dispersión de la radiación	6
1.4.2 Absorción de la radiación.....	6
1.4.3 Coeficiente de extinción.....	6
1.4.4 Profundidad óptica de los aerosoles	7
1.4.5 Parámetro de Ångström.....	8
1.4.6 Albedo de dispersión simple	8
1.5 Antecedentes	9
2 Diseño experimental	11
2.1 Sitio de muestreo.....	11
2.2 Descripción de los equipos.....	12
2.2.1 Aeronet.....	12
2.2.2 Fotómetro Solar.....	12
2.2.3 Modelo de dispersión HYSPLIT	14
3 Análisis y Resultados	15
3.1 Incendios forestales en la región del sureste	15
3.2 La profundidad óptica de los aerosoles atmosféricos (AOD) y el parámetro de Ångström.....	16
3.3 Tamaños de los aerosoles durante la quema de biomasa	19
3.3.1 Distribuciones por tamaños de aerosol durante las quemas de biomasa	22

3.4 Espesor óptico de los Aerosoles en función de la Longitud de onda	25
3.5 Índice de Refracción.....	27
3.6 El albedo de dispersión simple.....	28
3.7 Hysplit.....	30
3.8 Diagrama de clasificación de aerosoles.....	35
4 Conclusiones	37
5 Referencias	39
6 Anexos	45
A.1 Artículo en proceso de publicación con algunos resultados de esta tesis.....	45

Lista de abreviaturas y acrónimos

	Significado en inglés	Traducción al español
<i>AERONET</i>	Aerosol Robotic Network	Red Robótica de Aerosoles
<i>AOD</i>	Aerosol Optical Depth	Espesor óptico de los aerosoles
<i>BC</i>	Black Carbon	Carbón negro
<i>CONABIO</i>		Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
<i>DTA</i>		Distribución por tamaño de aerosol
<i>DTPA</i>		Distribución por tamaños de las partículas de aerosol
<i>HYSPLIT</i>	Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory	Modelo Híbrido Lagrangiano de Trayectoria Integrada de Partícula única
<i>MILAGRO</i>	Megacity Initiative: Local and Global Research Observations	Iniciativa de Megaciudades Locales y Observaciones globales de investigación
<i>MODIS</i>	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer	Espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada
<i>NASA</i>	National Aeronautics and Space Administration	Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio
<i>NOAA</i>	National Oceanic and Atmospheric Administration	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica
<i>PS</i>		Primavera-Seca
<i>PW</i>	Precipitable Water	Agua Precipitable
<i>SSA</i>	Simple Scattering Albedo	Albedo de dispersión simple
<i>TL</i>		Temporada de Lluvia
<i>UAC</i>		Universidad Autónoma de Chiapas
<i>VS</i>		Verano-Seco

Índice de figuras

▪ Figura 1: Distribuciones modales por tamaños de partículas según USEPA 2004, y Querol et al. (2001).....	4
▪ Figura 2: Esquema que ilustra los procesos que ocurren cuando la radiación interacciona con una partícula.	7
▪ Figura 3: Imágenes de incendios obtenidas por el MODIS en el satélite Aqua de NASA. Los puntos rojos indican los incendios ocurridos el 10 de abril del 2005 y el 06 de mayo del 2015 (https://www.nasa.gov/).....	10
▪ Figura 4: Mapa del sitio de muestreo	11
▪ Figura 5: Estaciones de monitoreo de la red AERONET, tomado de (https://aeronet.gsfc.nasa.gov/).....	12
▪ Figura 6: Fotómetro Solar CIMEL CE318.....	13
▪ Figura 7: Página para hacer el análisis Hysplit (http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php).....	14
▪ Figura 8: Imágenes de incendios en el sureste de México obtenidas por el MODIS de la NASA. Los puntos rojos indican los numerosos incendios en el sureste de México y Centro América durante la primavera de los años 2005 (a) y 2006 (b).	16
▪ Figura 9: Gráfica anual de los parámetros AOD, PW Y (α) (2005-2008).	17
▪ Figura 10: Distribución por tamaños de las partículas de aerosoles(DTPA) y parámetros (AOD, PW, (α)) para el año 2005.....	20
▪ Figura 11: DTPA y parámetros (AOD, PW, (α)) para el año 2006.	21
▪ Figura 12: DTPA y parámetros (AOD, PW, (α)) para el año 2007.	21
▪ Figura 13: Distribución de tamaño de partículas, por año.	23
▪ Figura 14: Distribución por tamaños de partícula de acuerdo con la época del año. VS (verano-seco de noviembre-febrero), PS (primavera-seca marzo-mayo) y TL (temporada de lluvia junio-octubre) para el año 2005.....	23
▪ Figura 15: Como la figura 14 pero para el año 2006.	24
▪ Figura 16: Como la figura 14 pero para el año 2007.	24
▪ Figura 17: Dependencia del AOD en función de la longitud de onda (λ).....	25
▪ Figura 18: Dependencia del AOD con la longitud de onda para el año 2005, dividido en 3 épocas: VS, PS y TL.....	26
▪ Figura 19: Comparación de AOD en función de la longitud de onda (λ) para África, Amazonas y nuestro sitio de estudio Tuxtla Gutiérrez; para el año 2005 en todos los casos.	27
▪ Figura 20: Índice de refracción de partículas emitidas en el sureste de México en 2005.	28
▪ Figura 21: Albedo de dispersión simple y longitud de onda.....	29
▪ Figura 22: Retro-trayectorias Hysplit para Tuxtla Gutiérrez, desde diferentes ubicaciones en diferentes días.	32
▪ Figura 23: AOD y distribución de tamaño por día de acuerdo a HYSPLIT.	34

- **Figura 24:** Diagrama de clasificación de aerosoles basado en la teoría de Gobbi et al., (2007). Se muestra la clasificación en dos temporadas: con y sin quema de biomasa..... 36

Índice de tablas

- **Tabla 1:** Clasificación de los aerosoles (Seinfeld y Pandis, 1998)..... 2
- **Tabla 2:** Promedios estacionales de AOD, PW y (α) (2005-2008) referente a la figura 9..... 18
- **Tabla 3:** Promedios de AOD y tamaño para cada día analizado. 31

Objetivo

Caracterizar partículas atmosféricas por quema de biomasa, mediante el análisis de la base de datos medidos durante cuatro años (2005-2008) por un fotómetro Solar CIMEL (CE318) asociado a la Red Robótica de Aerosoles (AERONET).

1 Introducción

Los incendios forestales o quemas de biomasa son una de las principales causas de pérdida de vegetación; pueden ser causados de manera natural o antropogénica (Cortés-Hernández y Aparicio, 2014). Las temperaturas altas, la sequías y la acumulación de biomasa muerta son las principales causas naturales; mientras que los cambios de uso del suelo con fines agrícolas y otras actividades humanas, como la tala de bosques, son la principal causa antropogénica.

Estas quemas son una fuente de emisión importante que contaminan el aire afectando nuestra salud considerablemente, e incluso afectan el balance radiativo, alcanzando su punto máximo durante la temporada seca.

En la región del Sureste de México, conformada por selvas tropicales, se presenta una cantidad significativa de quemas de biomasa durante la primavera (Conafor, 2005; CONABIO, 2010). Éstas emiten a la atmósfera cantidades considerables de dióxido de carbono (CO_2) y aerosoles compuestos principalmente de carbono negro (BC).

A nivel mundial, la quema de biomasa es una fuente grande de partículas finas de carbón y la segunda fuente más grande de gases traza. Estas quemas ocurren principalmente en los trópicos, afectando de manera importante la química atmosférica global (Andreae y Merlet, 2001; Kreidenweis et al., 2001; Yokelson et al., 2009).

Debido a la gran cantidad de emisiones de gases y partículas, la quema de biomasa en el sureste de México puede contribuir significativamente a la mala calidad del aire en algunas ciudades del sur de los Estados Unidos (EE.UU) y, localmente, afectando muchas poblaciones ubicadas en la región sureste y centro del país (Crouse et al., 2009).

Hasta el momento, existen pocos trabajos en donde se estudien las propiedades ópticas de los aerosoles generados por las quemas de biomasa en el sureste de México. Es por este motivo que en esta tesis se presenta la caracterización de estas partículas atmosféricas, mediante el análisis de una base de datos medidos durante cuatro años (2005-2008) por un fotómetro Solar CIMEL (CE318) asociado a la Red Robótica de Aerosoles (AERONET), establecida por la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA).

Esta red ofrece información relevante sobre la profundidad óptica de los aerosoles, la distribución por tamaños, el albedo de dispersión simple, los índices de refracción y la extinción total de la radiación por los aerosoles (Holben et al., 2001; Dubovik et al., 2002).

Adicionalmente, la ubicación geográfica de algunas estaciones de AERONET están asociadas con el Modelo Lagrangiano de Trayectorias Integradas de Partículas (HYSPLIT, por sus siglas en inglés), el cual estima las retro-trayectorias o procedencia de las masas de aire que pasan sobre el sitio de mediciones. Esto permite hacer una mejor caracterización de los aerosoles atmosféricos.

1.1 Marco teórico

1.2 Los aerosoles y sus fuentes de emisión

Un aerosol se define como una suspensión de partículas (sólidas o líquidas) en un fluido, con tamaños que van desde 10 angstroms (Å) a cientos de micrómetros (µm). Estas partículas son emitidas desde diferentes fuentes, las cuales se clasifican en dos grupos: naturales y antrópicas (tabla 1).

Las fuentes de emisión natural incluyen erupciones de volcanes, polvo proveniente del suelo, aerosol marino, quemas de biomasa y partículas biológicas; las antrópicas son el resultado de actividades realizadas por el hombre como polvos provenientes de actividad agrícola, procesos industriales, la quema de combustible fósiles, etc. (Jacobson et al., 2000).

Los aerosoles a su vez se clasifican en primarios y secundarios, los primarios son aquellos emitidos directamente como partículas a la atmósfera y los secundarios se forman a partir de reacciones entre partículas o por los procesos de conversión de gas a partícula (Mehlmann y Warneck, 1995; Alegría, 2015).

Tabla 1 Clasificación de los aerosoles (Seinfeld y Pandis, 1998).

<i>FUENTES</i>	<i>PRIMARIAS</i>	<i>SECUNDARIAS</i>
<i>NATURALES</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Aerosoles minerales • Sales marinas • Gases volcánicos • Desechos biológicos 	<ul style="list-style-type: none"> • Sulfatos (gases biogénicos) • Sulfatos (volcanes) • Orgánicos volátiles • Nitratos (provenientes de NO_x)
<i>ANTRÓPICAS</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Aerosoles Industriales • Hollín 	<ul style="list-style-type: none"> • Sulfatos (provenientes de SO₂) • Quema de biomasa • Orgánicos volátiles

En sitios urbanos las fuentes de emisión que predominan son las antrópicas: la mayoría de los gases liberados provienen de la quema de combustibles por automóviles y del sector industrial. El transporte público genera dos tipos de aerosol: los que provienen de motores que emiten haluros de plomo, sulfatos y hollín, que son partículas menores que $1\ \mu\text{m}$, y los que se generan por el desgaste de neumáticos, que son partículas menores que $10\ \mu\text{m}$.

Las emisiones industriales principalmente consisten en NO_x , CO , SO_2 y otros gases que provienen de la actividad en sus sistemas de producción (Seinfeld y Pandis, 1998; Jacobson 2002).

1.3 Propiedades físicas y químicas de partículas atmosféricas

1.3.1 El tamaño de las partículas

De manera general, el tamaño de las partículas se divide en dos categorías, finas y gruesa. Estas tienen diferente composición química, origen, procesos de remoción de la atmósfera, diferentes propiedades ópticas y difieren significativamente en sus patrones de deposición en el tracto respiratorio (Seinfeld y Pandis, 1998).

Como se muestra en la figura 1, se pueden distinguir distintos modos de distribuciones por tamaños (Seinfeld y Pandis, 1998).

Modo de Nucleación: Son partículas con diámetros $< 0.02\ \mu\text{m}$; atribuidas a precursores como H_2SO_4 , NH_3 y vapor de agua. El tiempo de vida de estas partículas es del orden de horas, ya que coagulan rápidamente con otras partículas o incrementan de tamaño por condensación. La nucleación se ve favorecida por descensos en la temperatura o incrementos en la humedad relativa (Eastern y Peter, 1994; Kulmala et al., 2001; Balán Pérez, 2013).

Modo Aitken: Son partículas con diámetros que van desde $0.02\ \mu\text{m}$ a $0.1\ \mu\text{m}$; pueden ser de origen primario (natural o antropogénico) o secundario (a partir de reacciones entre partículas o por los procesos de conversión). Aún se desconoce la composición química de estas partículas, pero es probable que las de origen secundario se formen por procesos de coagulación a partir del modo de nucleación, por condensación y por reacciones en fase líquida con compuestos inorgánicos (Matter et al., 1999; Balán Pérez, 2013).

Modo de acumulación: Son partículas con diámetros que van desde $0.1\ \mu\text{m}$ hasta $1\ \mu\text{m}$. Se forman por procesos de coagulación de las partículas más pequeñas y van aumentando su tamaño mediante la condensación de vapor de agua sobre las partículas ya existentes (Seinfeld y Pandis, 1998).

En la atmósfera, las partículas del modo Aitken crecen hasta formar parte del modo de acumulación por medio de reacciones en fase líquida que ocurren en las gotas de las nubes. La transferencia de masa es máxima en la nube a pesar del escaso tiempo de

reacción, debido al elevado volumen de agua y la velocidad de reacción en las nubes (Langner et al., 1992).

Modo grueso: estas partículas tienen diámetros mayores a $1\mu\text{m}$; formadas por procesos mecánicos, generalmente son polvos provenientes de la naturaleza, aunque también de origen antropogénico (Alegría, 2015). Este tipo de partículas son primarias, aunque también pueden estar constituidas de aerosoles secundarios debido a la interacción química de gases y otros procesos como la coagulación y condensación. Las partículas gruesas se eliminan por gravedad debido a su mayor masa, sedimentándose con tiempos de residencia de una hora.

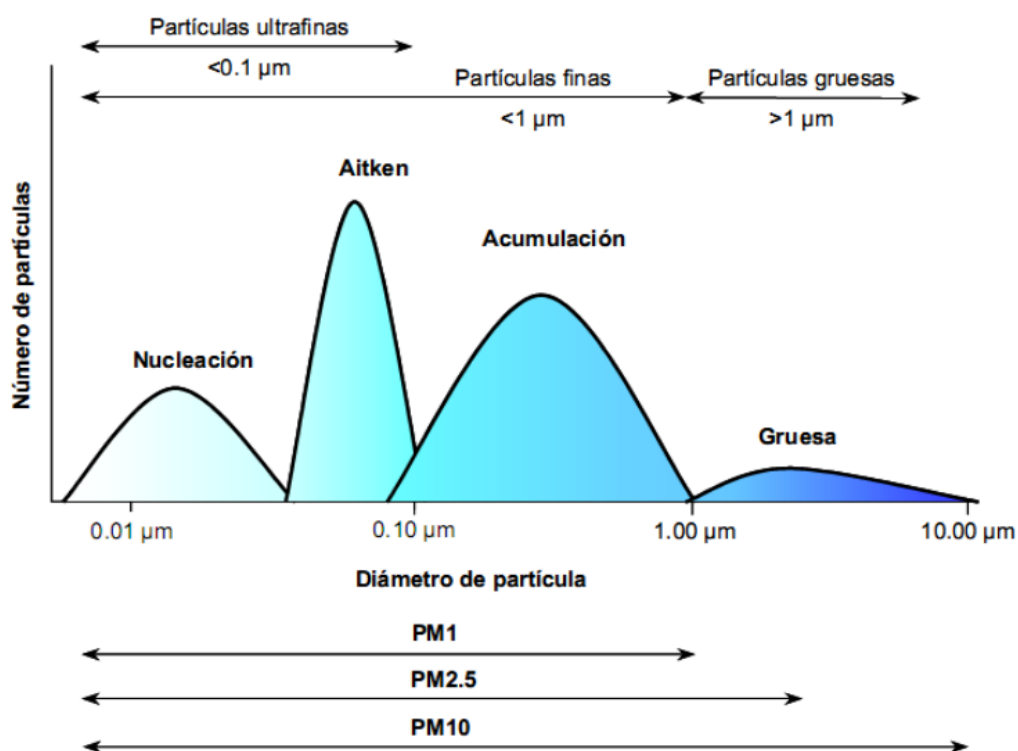


Figura 1: Distribuciones modales por tamaños de partículas según USEPA 2004, y Querol et al. (2001).

1.3.2 Composición química de los aerosoles

La composición química de los aerosoles varía de una partícula a otra. Ésta depende fundamentalmente de su origen, pero también es importante el proceso de formación y el tiempo de vida que tiene en la atmósfera.

Una fracción significativa de los aerosoles troposféricos es de origen antropogénico. Los aerosoles troposféricos contienen sulfato, amonio, nitrato, sodio, cloruro, metales traza, material carbonáceo, elementos de la corteza y agua; por ejemplo, las partículas de polvo procedentes del suelo contienen principalmente compuestos de calcio, aluminio y silicio (Seinfeld y Pandis, 1998).

En la fracción gruesa normalmente encontramos compuestos cristalinos, elementos biológicos primarios e incluso cenizas de carbón; en cambio, en la fracción fina las partículas normalmente están compuestas por aerosoles secundarios como el sulfato, nitrato, componentes orgánicos y de metales (Seinfeld y Pandis, 1998).

1.3.3 Quema de biomasa

A los incendios forestales en donde se destruye una gran extensión de vegetación se les denomina quema de biomasa. Estos incendios pueden iniciarse naturalmente debido a la alta radiación solar en épocas de sequía o pueden ser provocados por el hombre para fines agrícolas-ganaderos.

El consumo de estas quemas incluye pastizales, bosques y residuos agrícolas, que generan altas concentraciones de contaminantes a la atmósfera, lo cual repercute sobre ecosistemas naturales, en la salud y seguridad de los seres vivos. Sus efectos varían desde la irritación en ojos, piel y dificultades respiratorias, producto de los gases y aerosoles producidos por el fuego, hasta daños directos en plantas, animales, propiedades y personas (Galanter et al., 2000).

Se estima que la quema de biomasa, como madera, hojas, árboles y pastos (incluidos los residuos agrícolas), produce 40% del dióxido de carbono (CO_2), 32% del monóxido de carbono (CO), 20% de material particulado (PM) y 50% de los hidrocarburos aromáticos policíclicos emitidos al ambiente a escala mundial. Las quemas de residuos agrícolas son muy utilizadas a pesar de que no se trata de un manejo ambientalmente aceptable. Además, desde el punto de vista de la salud pública, resultan preocupantes por una serie de razones. (Andreae y Merlet, 2001; Jacob et al., 1996; Pereira et al., 1996).

El humo producido está dominado por partículas orgánicas finas con concentraciones variables de hollín, emitidas en la etapa caliente o de llama, esta última seguida por otra más fría, de brasa, en la cual se emite un humo compuesto de partículas orgánicas sin hollín, en mayores cantidades que durante la etapa de llama (Mielnicki et al., 2005).

1.3.4 Carbono Negro

El carbono negro es un forzante climático de vida corta, el cual se produce por la combustión incompleta e ineficiente de combustibles fósiles, biocombustibles y biomasa; también es denominado hollín, y se forma en la combustión a flama o en motores de combustión interna (Wallack y Ramanathan, 2009).

Las emisiones de los procesos de combustión se conocen en general como material particulado y se agrupan según su tamaño sea inferior a 10 micrómetros o a 2.5 micrómetros en PM10 y PM 2.5 respectivamente.

El carbono negro es una sustancia que absorbe la luz a través de un amplio espectro de longitudes de onda visibles. Por otra parte, el carbono orgánico en partículas se emite

directamente por las fuentes o puede ser el resultado de la condensación atmosférica de los gases orgánicos de baja volatilidad (Seinfeld y Pandis, 1998).

Una razón importante para el estudio de la materia orgánica en partículas ha sido la posibilidad de que tales compuestos representen un riesgo para la salud.

1.4 Propiedades ópticas de los aerosoles atmosféricos

1.4.1 Dispersión de la radiación

La dispersión es el fenómeno producido al interactuar una onda electromagnética con una partícula, dando lugar a una reemisión de la energía incidente en todas las direcciones del espacio, la figura 2 ilustra este fenómeno.

Desde un punto de vista fenomenológico, cuando las partículas son pequeñas en relación con la longitud de onda, éstas tienden a dispersar la misma cantidad de energía en todas las direcciones. Mientras que, si las partículas son comparables o mayores que la longitud de onda, la dispersión de energía se realiza principalmente en una dirección (Rothman et al., 1983).

1.4.2 Absorción de la radiación

La absorción es un proceso por el cual la radiación es captada por la materia, cuando se produce dentro del rango de luz visible se le llama absorción óptica.

Al ser absorbida, la radiación puede ser reemitida o transformarse en otro tipo de energía, como energía eléctrica o calor.

1.4.3 Coeficiente de extinción

La dispersión y absorción de radiación por moléculas de gas y aerosoles contribuyen a la extinción de la radiación solar y terrestre que pasa a través de la atmósfera (Wallace y Hobbs, 2006). La absorción y la dispersión ocurren simultáneamente porque todas las moléculas y partículas absorben y dispersan.

El coeficiente de extinción de las partículas (σ_{ext}) es la suma del coeficiente de absorción (σ_{Abs}) y el coeficiente de dispersión (σ_{Sct}) (Seinfeld y Pandis, 1998) y se expresa como:

$$\sigma_{\text{ext}} = \sigma_{\text{Abs}} + \sigma_{\text{Sct}} \quad (1)$$

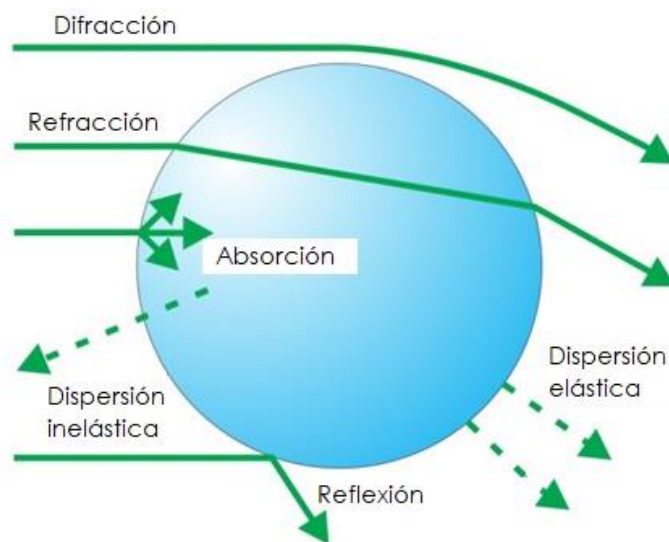


Figura 2: Esquema que ilustra los procesos que ocurren cuando la radiación interactúa con una partícula.

1.4.4 Profundidad óptica de los aerosoles

La profundidad óptica (AOD, por sus siglas en inglés) es una medida de la reducción de la luz o energía transmitida a través de una capa de gases, nubes o partículas. Esta reducción ocurre debido a procesos de absorción o interacción de la radiación con las partículas o gases. El AOD es un parámetro óptico importante que ayuda a estimar el balance radiativo de la Tierra; no tienen unidades de magnitud y es un parámetro adimensional.

El AOD se puede estimar empleando la Ley de Beer-Lambert:

$$I = I_0 e^{-\tau} \quad (2)$$

Donde I_0 es la intensidad de la radiación solar antes de penetrar la atmosfera (constante solar = 1366 Wm^{-2}), I es la intensidad de la radiación solar después de atravesar la atmosfera (valor medido por el fotómetro solar CIMEL) y τ es la profundidad óptica de los aerosoles.

El conjunto mínimo de longitudes de onda empleadas para las medidas de AOD son 440, 670, 870 y 1020 nm. También se utiliza un canal extra, de 940 nm, para la determinación del contenido total de vapor de agua precipitable. Por otro lado, a través de las medidas del fotómetro solar CIMEL también pueden obtenerse otras características de los aerosoles, como las distribuciones por tamaños y otras propiedades.

El AOD se ha utilizado en investigaciones locales, regionales y globales para caracterizar aerosoles, evaluar la contaminación atmosférica y hacer correcciones atmosféricas a los satélites de detección remota.

1.4.5 Parámetro de Ångström

El parámetro de Ångström describe la dependencia del AOD con la longitud de onda y es útil para evaluar el tamaño de las partículas de aerosol.

Esta dependencia espectral con el AOD es parametrizada mediante la Ley de Ångström a través de:

$$\tau = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (3)$$

donde β es el coeficiente de extinción y α es el exponente *de* Ångström.

El coeficiente de extinción (β) se relaciona directamente con la cantidad de aerosoles en la columna atmosférica, mientras que α está relacionado con el tamaño de los aerosoles presentes.

Los valores típicos para Ångström son:

- $\alpha \approx 0$: partículas gruesas como polvo, partículas higroscópicas o agregados
- $\alpha > 1.5$: partículas finas como partículas por quema de biomasa, etc. (Eck et al., 1999).

1.4.6 Albedo de dispersión simple

El albedo de dispersión simple (SSA, por sus siglas en inglés) se define como el cociente o la razón entre la energía dispersada y la extinguida. El SSA es un indicador de la capacidad absorbente del aerosol que depende de su composición química, forma y tamaño (Cortés-Hernández, 2014).

Los valores del SSA oscilan entre ~ 1 para las partículas no absorbentes y por debajo de 0,5 para las partículas que absorben fuertemente (Wallace y Hobbs, 2006). Se cree que los valores mayores a 0.85 enfrían al planeta, mientras que los que tienen un rango menor a éste lo calientan (Hansen et al., 1981).

Sin embargo, existe una gran variedad en los valores reportados de SSA debido a las grandes variedades en las estructuras físicas y químicas de los aerosoles (Takemura y Nakajima, 2001).

El albedo de dispersión simple se define como:

$$SSA = \omega_0 = \frac{\sigma_{Sct}}{\sigma_{ext}} \quad (4)$$

1.5 Antecedentes

La quema de biomasa proveniente de los incendios forestales es una fuente importante de contaminación del aire, produciendo aerosoles que tienen impactos globales, regionales y locales sobre la calidad del aire, la salud pública y el clima (Chen et al., 2017; Penner et al. 1992; Hobbs et al., 1997).

Los aerosoles emitidos por las quemas contienen una cantidad significativa de material orgánico y partículas de carbono negro que son eficientes absorbentes de la luz (Liu et al., 2016; Reid et al., 1998; Crutzen y Andreae, 1990; Bond et al., 2004).

Una vez en la atmósfera, estos aerosoles pueden sufrir una serie de transformaciones que incluyen coagulación, condensación y conversión de gas a partículas, que cambian sus propiedades físicas, químicas y ópticas (Bond et al., 2013; Kotchenruther y Hobbs 1998).; Reid y Hobbs 1998).

La quema de biomasa en América Central, la Península de Yucatán, el sur de México y Guatemala es una fuente importante de aerosol antropogénico en la tropósfera (Crutzen y Andrade, 1990). La contaminación de estos incendios afecta la calidad del aire a nivel local y se transporta a través del Golfo de México hacia los Estados Unidos, donde contribuye a la degradación de la visibilidad y la mala calidad del aire en el sureste de los Estados Unidos (In et al., 2007).

Los eventos de quema en la Península de Yucatán y Guatemala ocurren de marzo a mayo durante la estación seca tropical y finalizan a principios de junio cuando comienza la temporada de lluvias. Se observó que Yucatán, que representa el 7% de la superficie terrestre de México, contribuyó con casi el 30% de la biomasa total quemada en México anualmente (promedio 2002-2006) y casi el 40% de la biomasa quemada en México en 2006 (Yokelson et al., 2009).

El trabajo reportado por Yokelson et al., (2009) ha sido uno de los más representativos. En ese estudio, dos aeronaves instrumentadas con equipos sofisticados realizaron las primeras mediciones detalladas de las emisiones generadas por la quema de biomasa en el trópico del hemisferio norte en marzo del 2006.

Ese trabajo fue parte del proyecto MILAGRO (Iniciativa de Mega Ciudades Locales y Observaciones Globales de Investigación); programa diseñado para estudiar los efectos atmosféricos locales y globales de la contaminación de las mega ciudades.

Los resultados de este estudio dieron pie a muchos otros trabajos relacionados con la quema de biomasa. En su indicaron que los residuos por quema de biomasa generados en Yucatán pueden tener grandes alcances, pudiendo afectar inclusive la calidad del aire de la ciudad de México y algunas urbes ubicadas en el sur de los Estados Unidos.

Un estudio más reciente sobre la quema de biomasa en México es el reportado por Cortés-Hernández y Aparicio, (2014), donde se hace una caracterización de aerosoles por quema de biomasa en Tenosique, Tabasco y Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

El uso de satélites también ha permitido identificar la región del sureste de México como una de las más activas en cuanto a quemas de biomasa durante la primavera. Estos incendios consisten en una de las principales causas de pérdida de vegetación, que es consumida en actividades agrícolas (Cortés-Hernández y Aparicio, 2014; Yokelson, 2009) como se visualiza en la figura 3.

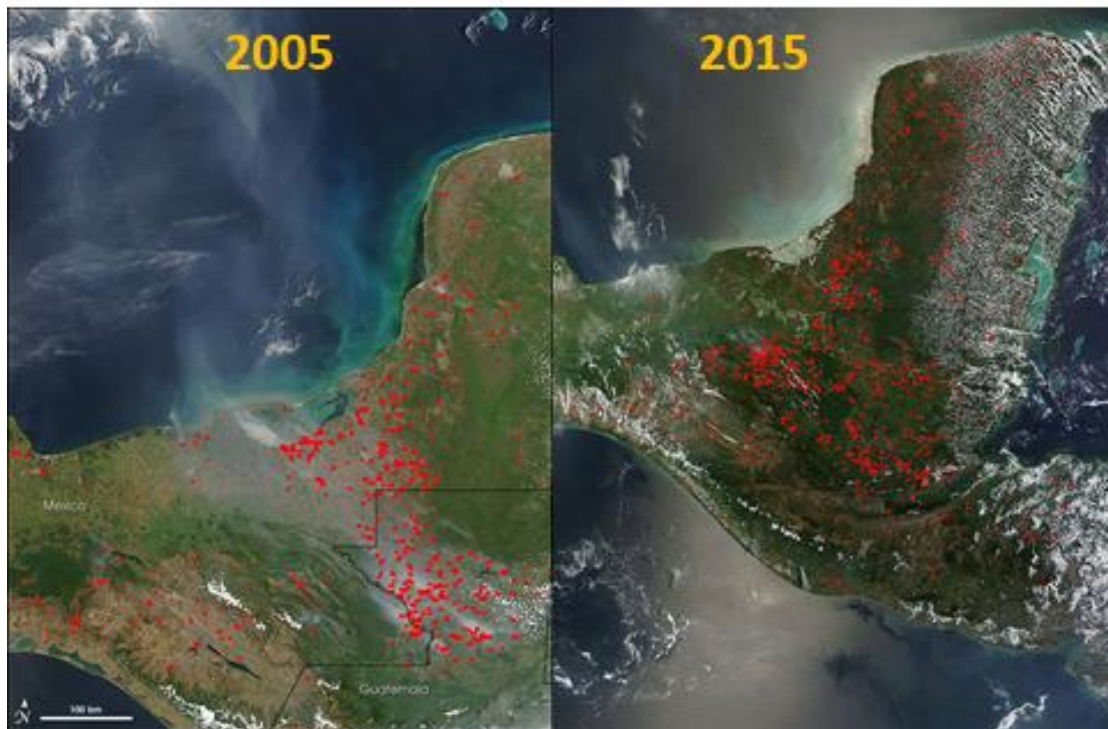


Figura 3: Imágenes de incendios obtenidas por el MODIS en el satélite Aqua de NASA. Los puntos rojos indican los incendios ocurridos el 10 de abril del 2005 y el 06 de mayo del 2015 (<https://www.nasa.gov/>)

2 Diseño experimental

2.1 Sitio de muestreo

La estación de medición se instaló en el campus de la Universidad Autónoma de Chiapas (UAC) ubicada en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez que es la capital del Estado de Chiapas (Figura 4), es el municipio más desarrollado y poblado (598,710 habitantes) y, por lo tanto el más importante del Estado (INEGI, 2018).

En la parte sureste del estado de Chiapas, a unos 300 kilómetros de la ciudad Tuxtla Gutiérrez se encuentra la región Lacandona, que representa la parte más occidental de la selva Maya y se extiende a través de Guatemala hasta las Montañas Mayas de Belice, y al norte hasta la parte media de la Península de Yucatán. Con una extensión de 13,000 km², esta región representa una de las áreas más grandes de selva tropical en México, y un área prioritaria para la conservación de la biodiversidad en Mesoamérica. Sin embargo, ha sido fuertemente deforestada durante los últimos 40 años (INE, 2000; Falkowski et al., 2016).



Figura 4: Mapa del sitio de muestreo

La selva tropical es el segundo ecosistema más extenso en México, que cubre más del 15% de la nación. Este ecosistema se puede dividir en dos tipos principales de bosques: bosques tropicales y bosques secos. Los bosques tropicales se encuentran en lugares cálidos y muy húmedos, principalmente en la zona del Atlántico, las llanuras del Golfo de México, al sureste de la Península de Yucatán y en los alrededores de Chiapas (Challenger y Soberon, 2008; Becerra, 2005).

Este tipo de bosque es el más diverso de México, pues alberga 5000 especies de plantas (17% de todas las que se encuentran en México) pero también es el más amenazado (Challenger y Soberon, 2008; CONAFOR, 2012).

Por otro lado, el bosque seco tropical es uno de los cuatro tipos de vegetación más extensos de México. En su estado natural, es una comunidad densa dominada por árboles de bajo a mediano tamaño que pierden sus hojas durante la estación seca. Este bosque está muy extendido en las laderas del Pacífico de México y cubre grandes extensiones desde el centro de Sonora y el sureste de Chihuahua, hasta el estado sureño de Chiapas y continúa hasta Centroamérica.

2.2 Descripción de los equipos

2.2.1 Aeronet

AERONET (Aerosol Robotic Network) es una red de fotómetros para hacer mediciones de aerosoles con el objeto de estudiar las propiedades ópticas de éstos; establecida por la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) y el Laboratorio de Óptica Atmosférica (LOA) de la Universidad de Lille, Francia.

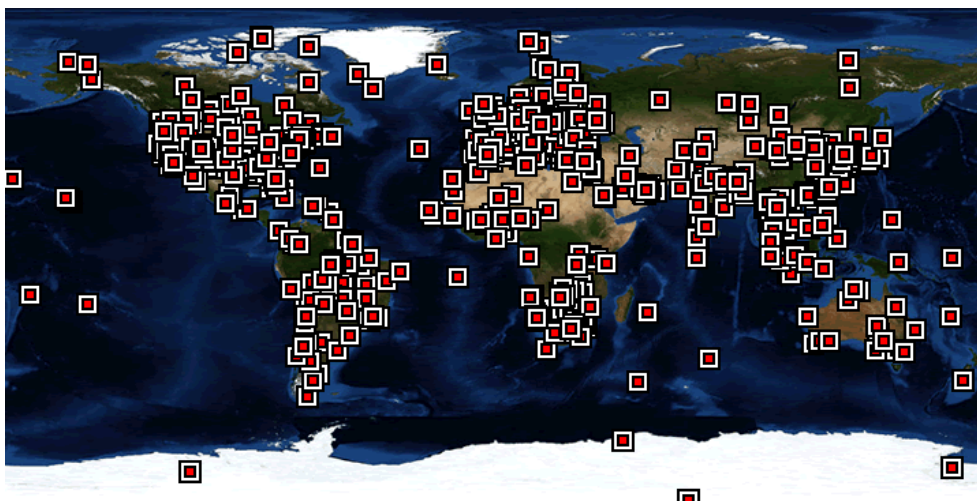


Figura 5: Estaciones de monitoreo de la red AERONET, tomado de (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>)

Aeronet proporciona una base de datos de dominio público a largo plazo, es una red con una base de datos accesible de propiedades ópticas y microfísicas de el aerosol, que se han empleado para su investigación y caracterización.

Esta red proporciona observaciones distribuidas a nivel mundial (Figura 5) de la profundidad óptica de los aerosoles (AOD), así como otros productos. Los datos del AOD se calculan para tres niveles de calidad de datos: nivel 1.0 (sin filtros), nivel 1.5 (filtrado) y nivel 2.0 (filtrado y asegurado con alta calidad).

2.2.2 Fotómetro Solar

Las mediciones en este estudio se realizaron con un fotómetro solar CIMEL (CE-318), que es un radiómetro espectral automático; como el que se muestra en la figura 6.

El CIMEL se instaló en el techo del edificio principal de la UAC (16 ° 45 'N, 93 ° 9' E y 590 metros de elevación). El fotómetro CE-318 que se usó para este trabajo cumple con los estándares de calibración, los cuales se ajustan a los que solicita la red global AERONET (Holben et al., 1998). Los valores del AOD se midieron dentro del rango espectral de 340-1020-nm. El exponente Ångström (α) se deriva de las bandas de 440-870 nm utilizando la regresión lineal de $\ln(\text{AOD})$ frente a $\ln(\lambda)$.



Figura 6: Fotómetro Solar CIMEL CE318

Es un instrumento diseñado para medir automáticamente la radiación solar directa en 8 diferentes longitudes de onda 340, 380, 440, 500, 675, 870, 937, 1020 nm (Gómez-Amo et al., 2006).

El fotómetro solar CE318 está compuesto de tres partes esenciales: el cabezal óptico, la caja electrónica y el robot. El cabezal óptico es la parte más importante del instrumento y está compuesto de dos cámaras ópticas, en donde se realizan las mediciones. Estas cámaras tienen un diseño especial, que incluye un colimador, el cual facilita la detección de la radiación solar directa. El flujo de radiación solar es medido por un detector que contiene un material fotovoltaico, ubicado en la parte inferior de las cámaras ópticas.

La caja electrónica contiene los elementos que controlan la operación en tiempo real del instrumento. Está compuesta por dos microprocesadores que controlan el movimiento del instrumento y facilitan la adquisición de datos en tiempo real. El equipo cuenta con un sensor de humedad que detecta la precipitación y obliga al instrumento a estacionarse y proteger la óptica.

Por otro lado, el robot es movido por motores que se mueven en dos direcciones: en los planos del cenit y el azimutal. El seguimiento del sol se realiza por medio de detectores de 4 cuadrantes, que dan la ubicación precisa del Sol. Finalmente, en los microprocesadores (en la caja de control) también se realiza el cálculo de las ecuaciones solares (ecuación de Beer-Lambert y masas de aire) para la estimación de la profundidad óptica.

Para obtener el AOD se emplea la Ley de Beer, la cual indica, que el espesor óptico total se obtiene comparando el flujo de radiación solar directa (F) medida por el fotómetro, con el flujo de la radiación solar en la parte superior de la atmosfera (antes de penetrar la capa atmosférica) (F_0):

$$\tau(\lambda) = -\frac{1}{m_0} \ln \frac{F(\lambda)}{\rho^{-2} F_0(\lambda)} \quad (5)$$

donde m_0 es la masa óptica, que estima la longitud del trayecto recorrido por la radiación solar cuando atraviesa la atmósfera.

Por otra parte, ρ es el radio vector o distancia relativa entre el Sol y la Tierra, la cual corrige los cambios a lo largo del año, en el flujo de la radiación solar directa en la parte superior de la atmósfera (F_0).

El fotómetro Cimel, también utiliza el canal de 940 nm, para la determinación del contenido total de vapor de agua precipitable. Por otro lado, a través de las medidas del fotómetro solar CIMEL también pueden obtenerse otras características de los aerosoles, como las distribuciones de tamaño y el albedo de dispersión simple.

2.2.3 Modelo de dispersión HYSPLIT

El modelo Híbrido Lagrangiano de Trayectoria Integrada de Partícula Única (HYSPLIT, por sus siglas en inglés), modela el transporte de masas de aire (Figura 7). Es un servicio del Laboratorio de Recursos Atmosféricos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de Estados Unidos (Draxler y Rolph, 2005).

Se utiliza para estimar la trayectoria progresiva o regresiva de una masa de aire y es útil para interpretar eventos que afectan la calidad del aire. Las trayectorias progresivas ayudan a determinar la dispersión de los contaminantes, y las regresivas ayudan a determinar los orígenes y fuentes de contaminantes (Wenpo et al., 2009; Servir, 2003).



Figura 7: Pagina para hacer el análisis Hysplit (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>)

3 Análisis y Resultados

3.1 Incendios forestales en la región del sureste

En esta sección se presentarán los principales resultados obtenidos del análisis de aerosoles generados por la quema de biomasa en el sureste de México en el periodo de años comprendidos entre el 2005 y 2008. Esta región de la República Mexicana anualmente sufre numerosos incendios forestales que se extienden sin control afectando a la fauna y la flora de la región.

Algunas agencias estatales de la región han informado que, en promedio durante un año, las conflagraciones en bosques pueden impactar aproximadamente 1000 hectáreas de esas zonas, principalmente áreas de maleza.

En la Figura 8 se muestran imágenes de incendios en el sureste de México, obtenidas por el MODIS de la NASA. Estas imágenes presentan la distribución espacial de los incendios en los días 10 y 4 de abril de los años 2005 y 2006 (fig. 8 a y b), respectivamente. Las figuras presentan diferencias en la distribución de los incendios. La mayoría de los incendios se concentran en zonas cercanas a la costa de la península de Yucatán frente al Golfo de México.

A lo largo de la costa de Yucatán, hay una cantidad significativa de población, empezando desde de la ciudad de Cancún en el estado de Quintana Roo, pasando por Mérida en Yucatán hasta la ciudad de Villa Hermosa en el estado de Tabasco. Estas son las ciudades más importantes del sureste, cada una con una población de menos de 1 millón de habitantes, pero con un número significativo de habitantes que viven en áreas rurales que se extienden tierra adentro, hasta delimitar con zonas de reservas ecológicas importantes (Reservas de la Biosfera Calakmul y Maya).

Los patrones de actividad de incendios forestales observados en los bosques del sureste de México han sido moldeados por la influencia de los seres humanos, que lentamente aumentan sus actividades antropogénicas, lo que crea áreas propicias para el inicio de incendios. En muchas comunidades rurales mexicanas, la agricultura es la principal causa de una grave degradación forestal que provoca los incendios.

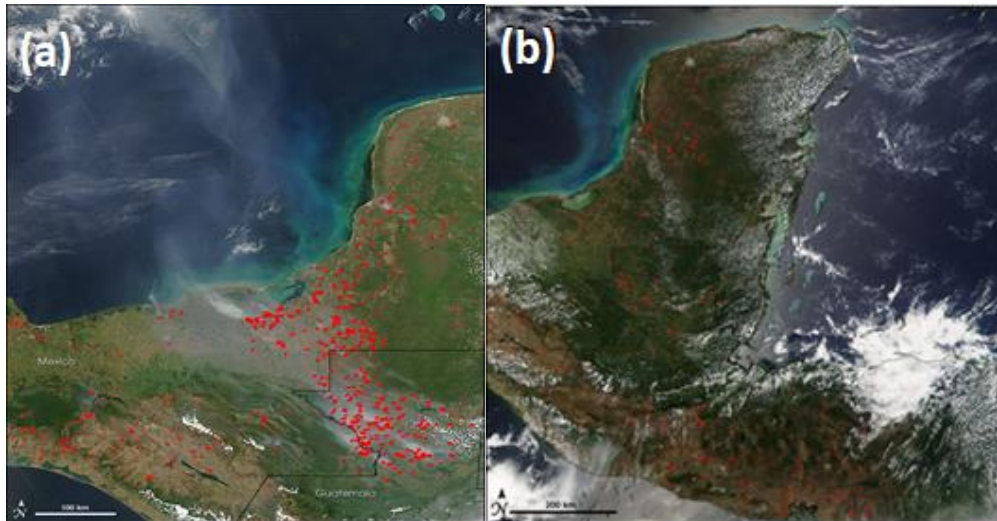


Figura 8: Imágenes de incendios en el sureste de México obtenidas por el MODIS de la NASA. Los puntos rojos indican los numerosos incendios en el sureste de México y Centro América durante la primavera de los años 2005 (a) y 2006 (b).

3.2 La profundidad óptica de los aerosoles atmosféricos (AOD) y el parámetro de Ångström

Como se mencionó anteriormente, la profundidad o el espesor óptico de los aerosoles (AOD) y el exponente de Ångström (α) nos dan información importante sobre características de las partículas emitidas a la atmósfera.

Con estos parámetros se puede conocer el grado de interacción entre las partículas y la radiación solar, así como estimar sus tamaños. Toda esta información nos permite concluir sobre el origen y posibles fuentes de estos contaminantes. También permiten estudiar los procesos físicos que intervienen en la formación y evolución de los aerosoles en la atmósfera.

La figura 9 muestra los promedios anuales del AOD, (α) y el vapor de agua precipitable (PW). Los datos fueron medidos con el fotómetro CIMEL CE-318 ubicado en Tuxtla Gutiérrez, los cuales fueron descargados desde el portal de la red AERONET.

El principal objetivo de esta figura es determinar las temporadas del año donde hay una mayor emisión de partículas originadas por la quema de biomasa. Es importante tener en cuenta que el fotómetro se ubicó dentro de la zona urbana de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, en donde también hay una emisión significativa de partículas de aerosol debido a actividades antropogénicas.

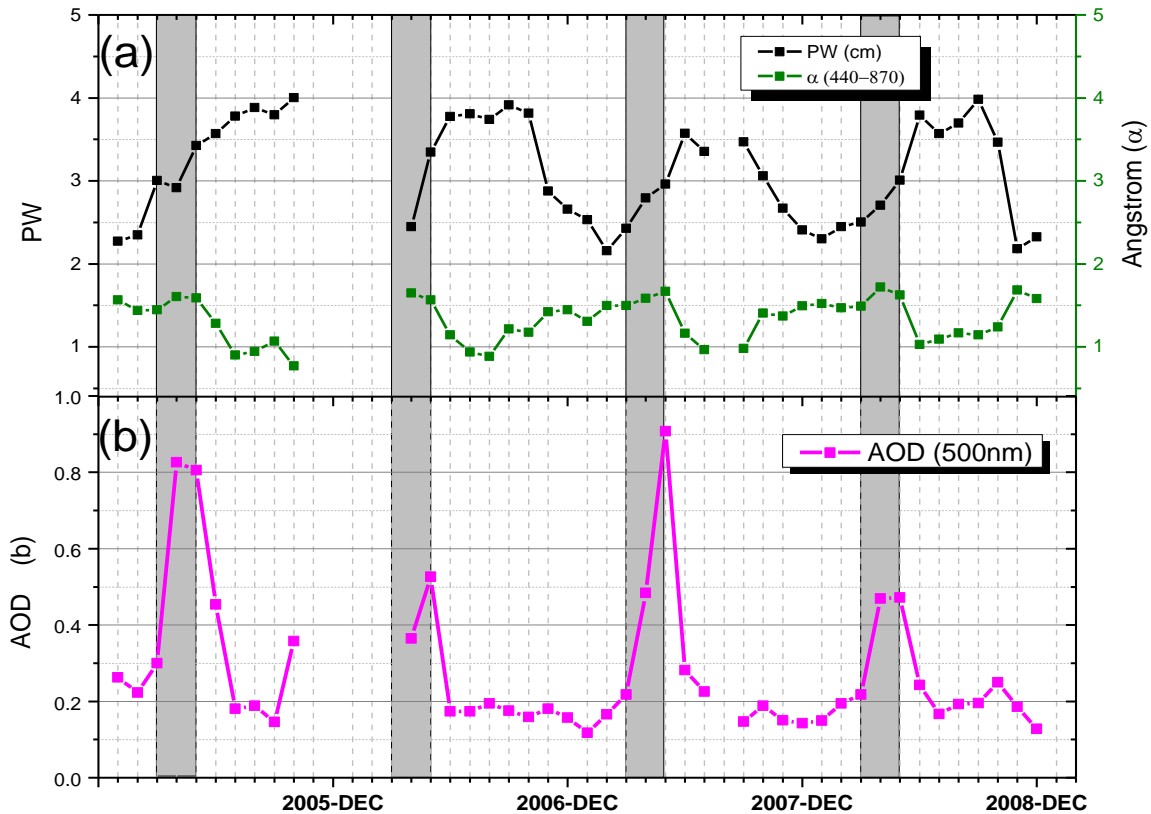


Figura 9: Gráfica anual de los parámetros AOD, PW Y α (2005-2008).

En la figura 9 (a) se muestra la tendencia de los promedios mensuales de parámetros α y de PW. Se observa que los valores más altos de α (alrededor de 1.6) se presentan en los meses de marzo y abril que pertenecen a los meses de la primavera.

Como se mencionó anteriormente los valores altos de α (> 1) indican la presencia de una distribución bimodal de aerosoles en donde predominan las partículas finas (tamaños aproximados de $0.1 \mu\text{m}$).

La serie de tiempo para PW, presenta un comportamiento estacional, en donde los valores más altos ocurren durante la época de lluvias. Es importante analizar el comportamiento de PW, porque este parámetro afecta directamente las mediciones del AOD y del tamaño de las partículas. Los valores altos de PW podrían generar un incremento en el espesor óptico.

El PW también afectaría la distribución por tamaños de aerosol, debido a que algunas partículas podrían ser higroscópicas, lo cual podría generar un aumento en el tamaño. Durante los meses de primavera, PW no presenta variaciones significativas, con un valor promedio de 3 cm.

En la figura 9 (b) se presenta el comportamiento del espesor óptico, el cual se graficó obteniendo el promedio mensual de las mediciones. En la figura se observa que los valores mayores del AOD se presentan en los meses de marzo y abril, con un máximo de 0.90 para la primavera del año 2007.

Este pico observado en 2007 se debe a una significativa emisión de partículas, lo cual representa un mayor número de eventos de quema de biomasa o un aumento en la intensidad de los incendios.

En la figura 9, los años resaltados con el color gris indican los meses de primavera (marzo-mayo), donde se observa un claro incremento en los valores de AOD y α . El aumento de los valores empieza a partir del mes de marzo alcanzando su máximo en mayo. Estos incrementos coinciden con las quemadas de biomasa en la zona.

Por otra parte, el promedio de los valores mínimos del AOD para los datos estudiados (2005 – 2008) es de 0.16. Este valor se presenta en los meses del año donde no ocurre quema de biomasa, lo cual evidencia la presencia de emisiones locales, pues el sensor se encuentra ubicado en la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez.

La tabla 2 muestra los valores promedio (estacionales) del AOD, α y PW para los meses con eventos de quema de biomasa (primavera, marzo – mayo) y aquellos meses sin quemadas (verano e invierno, junio – febrero). En esta tabla se observa claramente que en los meses de primavera los valores de los parámetros son mayores, excepto para el PW.

Esto muestra que el valor promedio del AOD durante los meses de quema de biomasa es 2.5 veces mayor que el valor obtenido en las otras temporadas (invierno – verano). Estas diferencias muestran la mayor tendencia absorbente de las partículas durante la primavera, con menores tamaños que aquéllas observadas en otras temporadas del año.

Tabla 2 Promedios estacionales de AOD, PW y (α) (2005-2008) referente a la figura 9.

	Invierno-verano	Primavera
AOD	0.19	0.50
α	1.23	1.58
PW	3.20	2.86

3.3 Tamaños de los aerosoles durante la quema de biomasa

Con el fin de tener más información sobre las propiedades ópticas de los aerosoles generados por la quema de biomasa, se analizó la distribución por tamaños de aerosol (DTA) y los promedios diarios de los principales parámetros medidos por el fotómetro solar CE-318 instalado en Tuxtla Gutiérrez.

En las figuras 10, 11 y 12 se presentan los promedios diarios de los parámetros AOD, α , PW y la DTA para los años 2005, 2006 y 2007 respectivamente. Para el año 2008 el fotómetro Solar no obtuvo muchos datos, por lo que no se tomó en cuenta para este análisis.

Las figuras 10 (a), 11 (a) y 12 (a) muestra el comportamiento del exponente de Ångström (α) y de PW. Nuevamente se observa que α presenta los valores más altos durante los días de primavera (días julianos 80-140), con picos máximos de aproximadamente 1.8 que confirman la predominancia de partículas con tamaños de alrededor de 0.1 μm , en una distribución bimodal. Por otro lado, PW sigue una tendencia estacional con días que alcanzan valores máximos de 4.5 cm.

Las figuras 10 (b), 11 (b) y 12 (b) muestran los promedios diarios del AOD, claramente se observa el rápido incremento en los valores, que empieza en el mes de marzo, alcanzando picos máximos a mediados de abril, que posteriormente decrecen en mayo hasta alcanzar los valores mínimos. Los picos observados en días posteriores posiblemente se deben a incendios remanentes de baja intensidad, que son activados por rachas de vientos con velocidades medias. Es importante resaltar los valores máximos del AOD que se alcanzan durante la primavera, pues en todos los casos el AOD presenta valores mayores a uno.

En la figura 11 (b) durante la primavera, se alcanzan valores del AOD > 1 , que indican una concentración alta de partículas atmosféricas. Algo que sorprende, son los valores máximos observados en las figuras 10 (b) y 12 (b), pues están alrededor de 2.0, el cual es un valor muy alto del espesor óptico. Este valor se podría indicar una alta producción de aerosoles debido a incendios muy intensos.

Para poner en contexto la magnitud de los valores del AOD observados en este estudio, se puede hacer una comparación con los valores del AOD registrados en la Ciudad de México (atmósfera muy contaminada), en donde se encuentra que los valores medidos en Tuxtla Gutiérrez son aproximadamente 4.5 veces mayores. Lo anterior indica la gravedad de estos incendios, y los efectos que podrían causar en la salud de las personas que residen en zonas cercanas.

Las figuras 10 (c), 11 (c) y 12 (c) muestran la distribución por tamaños a lo largo de cada año (en el intervalo de días Julianos desde el 25 hasta el 240). Los colores van de azul a rosa, donde los colores más intensos (rosados) muestran las partículas con radios más pequeños. Se puede apreciar que las partículas con volúmenes mayores son las

partículas finas que se encuentran en los meses de primavera (días julianos 60-150), justo donde encontramos los picos más altos para AOD y α .

La anterior tendencia se observa muy bien para los datos medidos en el 2005 (figura 10 c), en donde la mayor concentración de partículas con tamaños de aproximadamente $0.1 \mu\text{m}$, ocurre durante la primavera, coincidiendo con los valores altos del AOD observados en ese mismo periodo de tiempo. Aunque las partículas gruesas ($\sim 1.0 \mu\text{m}$) no presentan altas concentraciones, éstas también presentan cantidades significativas durante el período de las quemadas de biomasa. Muchas de estas partículas gruesas se originan por la re-suspensión de polvos.

Comparando los gráficos de los tres años, se observó que los años con mayores concentraciones de partículas por quema de biomasa son 2005 y 2007, los cuales muestran valores del AOD máximos de 1.96 y 1.83, respectivamente.

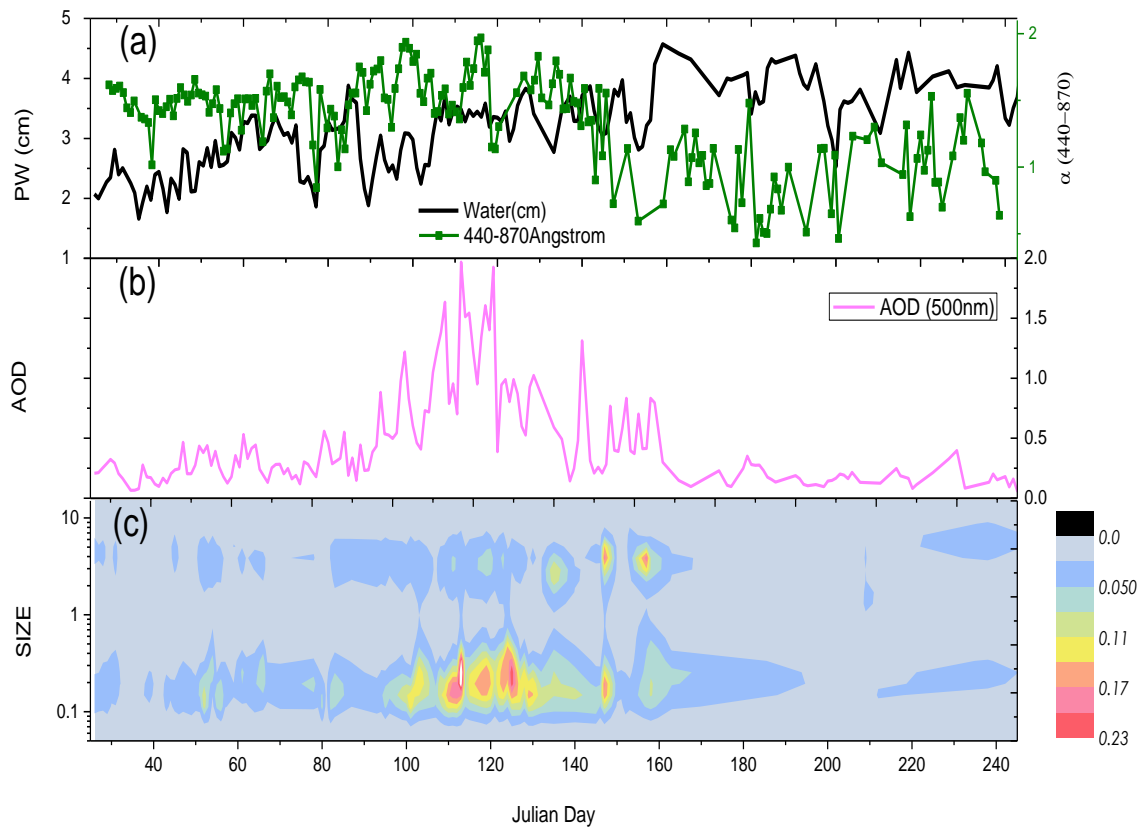


Figura 10: Distribución por tamaños de las partículas de aerosol (DTPA) y parámetros (AOD, PW, α) para el año 2005.

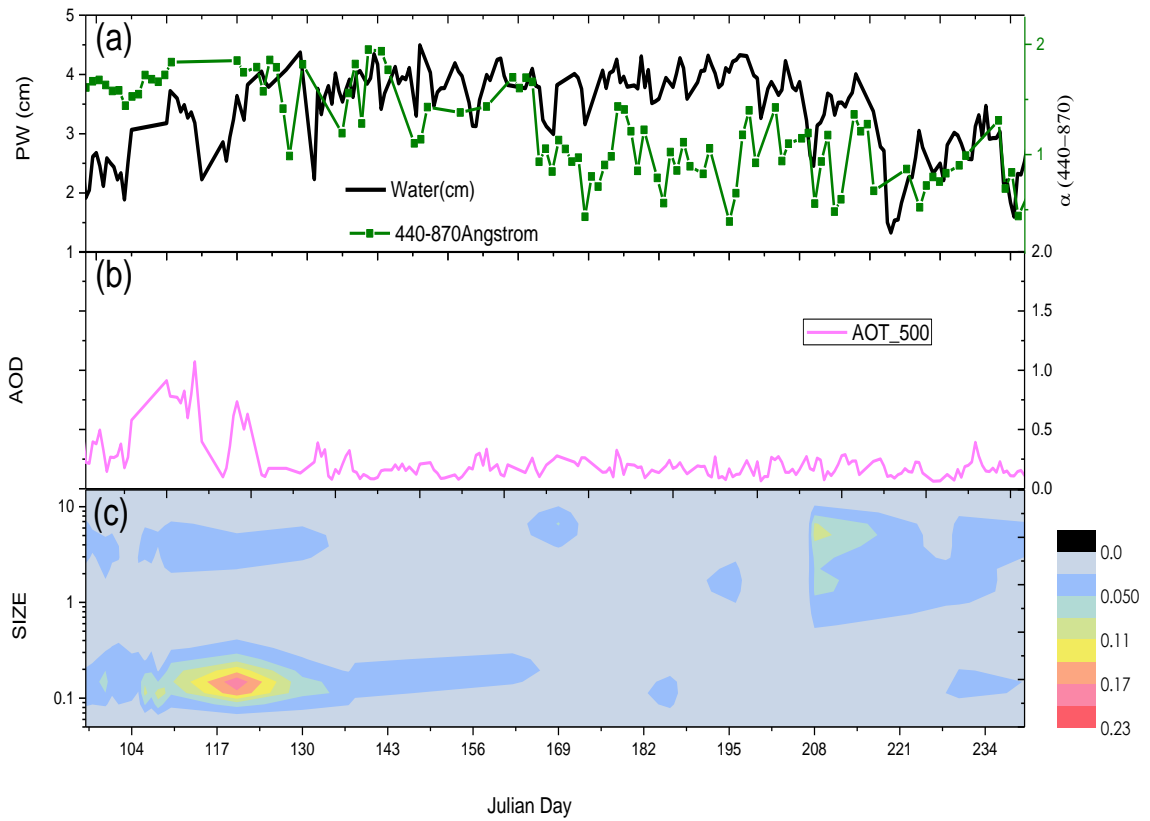


Figura 11: DTPA y parámetros (AOD, PW, α) para el año 2006.

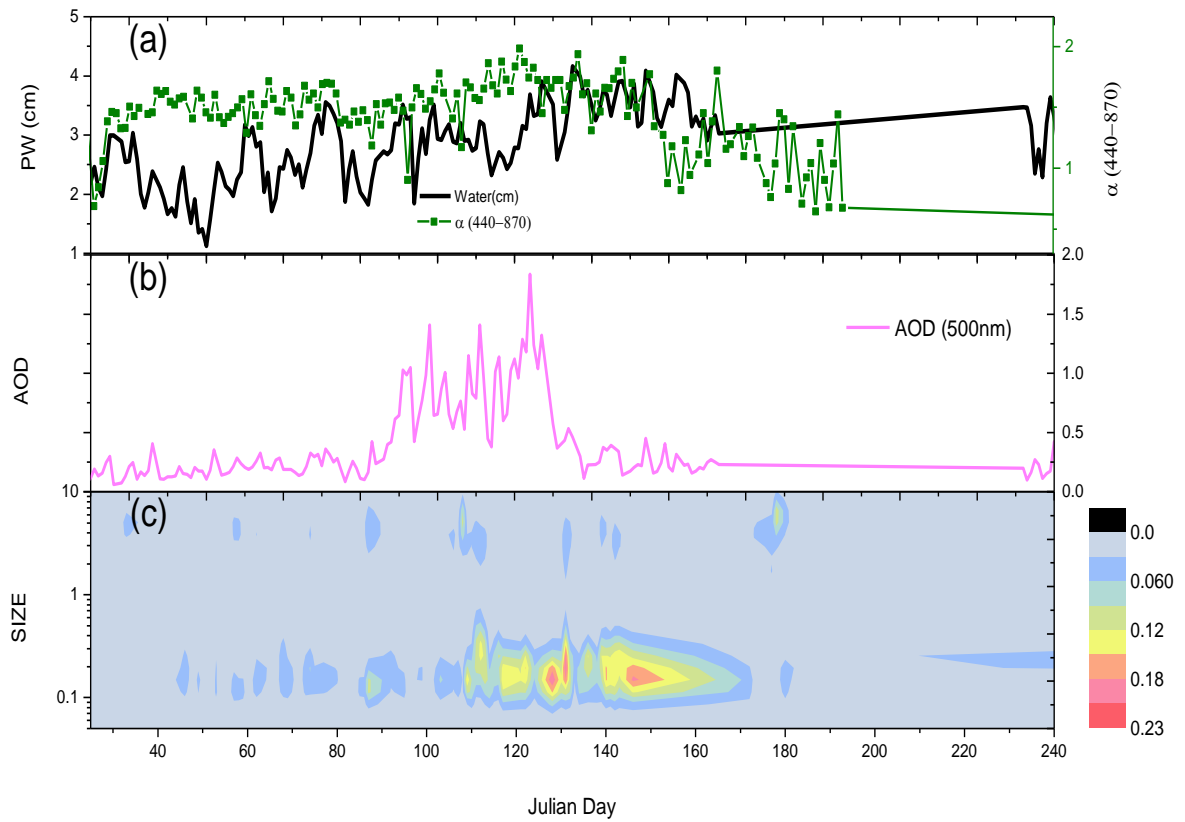


Figura 12: DTPA y parámetros (AOD, PW, α) para el año 2007.

3.3.1 Distribuciones por tamaños de aerosol durante las quemas de biomasa

La distribución por tamaños de aerosol (DTA) juega un papel fundamental en la interacción de éstos con la radiación solar y el tiempo de residencia en la atmósfera. Estas propiedades dependen de las fuentes y de los procesos que los han generado. Para estudiar el tamaño de los aerosoles generados por la quema de biomasa, se graficaron curvas de distribuciones por tamaños de las partículas para cada año (Figura 13).

Basados en la meteorología de B. de Foy et al., (2005), quienes describen para México tres estaciones a lo largo del año: verano-seco (VS), primavera-seca (PS) y la temporada de lluvias (TL), se realizó un análisis estacional de la distribución por tamaños de aerosol.

La figura 14 muestra el comportamiento estacional de las distribuciones por tamaños de partículas, medidas en el sitio AERONET de Tuxtla Gutiérrez para el año 2005, que se calcularon utilizando promedios mensuales. La figura muestra curvas bimodales en donde predominan las partículas con radios más pequeños para los cuatro años. El año 2005 presenta una concentración más alta de partículas, esto es un indicio de que pudo ser éste un año muy activo en cuanto a quema de biomasa.

Estas distribuciones presentan un comportamiento bimodal con volúmenes (V) máximos en el modo fino en los tamaños comprendidos entre 0.1 y 0.2 μm y para el modo grueso en el intervalo de 3.9 – 5.0 μm . El intervalo de tamaños de partícula en este estudio coincide con los valores encontrados en estudios anteriores de Eck et al., (1999), sobre la caracterización de aerosoles de quema de biomasa realizados en América del Sur.

Por otro lado, se observa que todas las distribuciones presentan el modo fino (partículas generadas en los procesos de combustión incompleta), siendo esto dominante en todas las estaciones. Sin embargo, el volumen de partículas finas en la primavera es ~2.5 veces mayor que los volúmenes medidos en el las temporadas del año (inviernos y lluvias).

La alta concentración de partículas finas durante la temporada primavera, está fuertemente asociada a la alta cantidad de emisiones durante las quemas de biomasa y a la formación de nuevas partículas promovida por un intenso proceso fotoquímico.

Las partículas por quema de biomasa también son muy evidentes en los años 2006 y 2007 (figuras 15 y 16), sin embargo, para el año 2008 el sensor no obtuvo datos del tamaño de partículas para el periodo que va de marzo a julio, por lo que tampoco fue tomado en cuenta para este análisis.

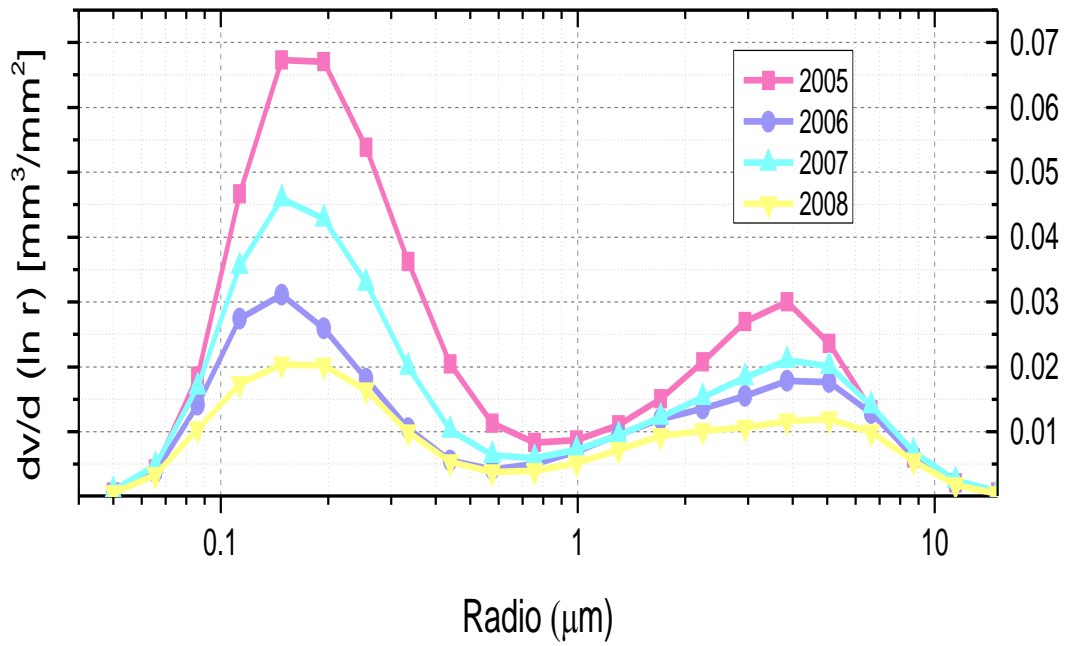


Figura 13: Distribución de tamaño de partículas, por año.

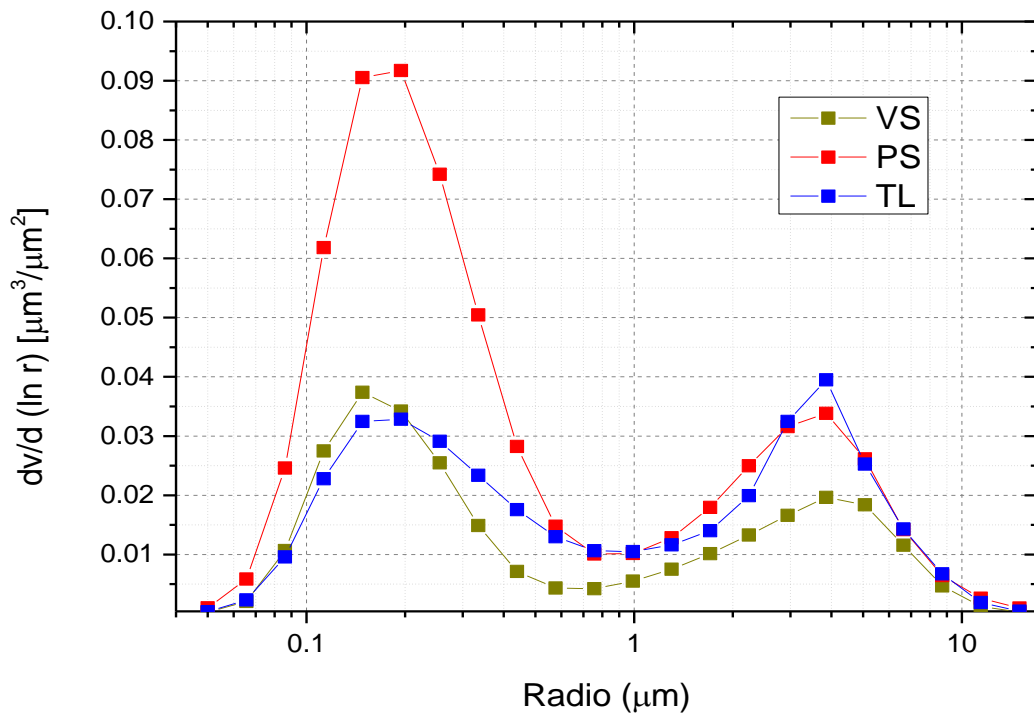


Figura 14: Distribución por tamaños de partícula de acuerdo con la época del año. VS (verano-seco de noviembre-febrero), PS (primavera-seca marzo-mayo) y TL (temporada de lluvia junio-octubre) para el año 2005.

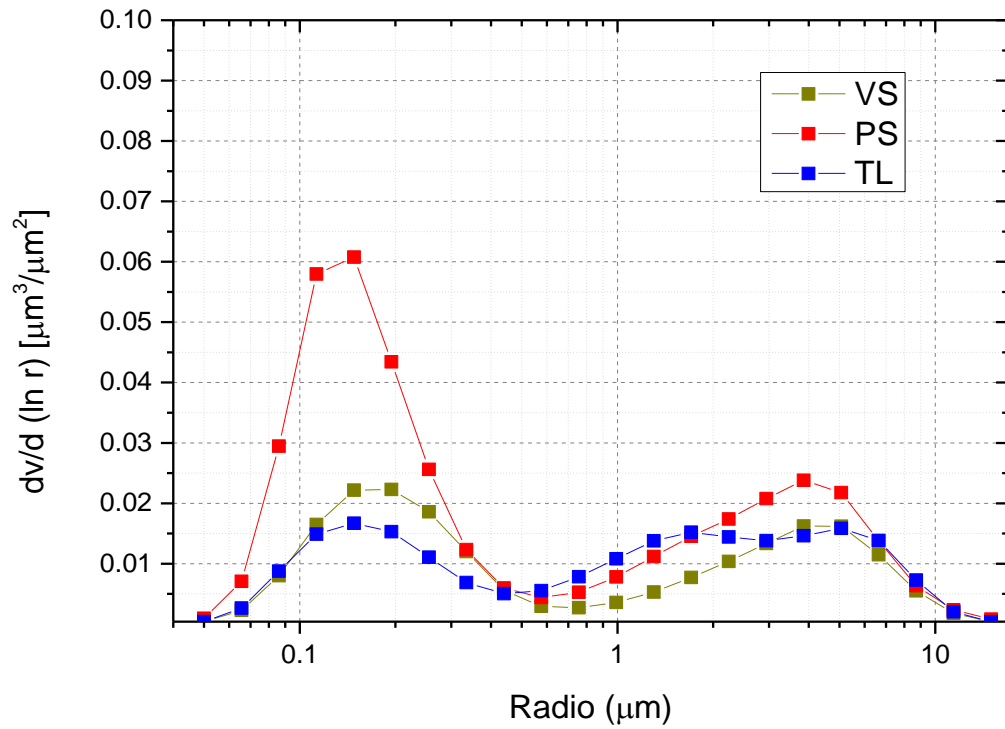


Figura 15: Como la figura 14 pero para el año 2006.

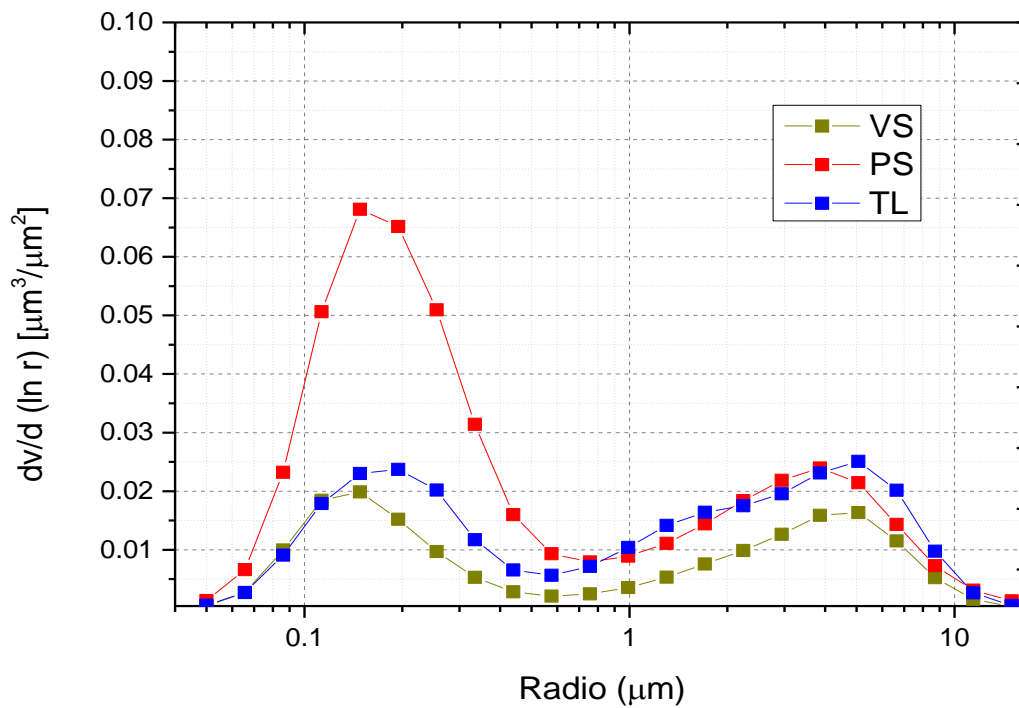


Figura 16: Como la figura 14 pero para el año 2007.

3.4 Espesor óptico de los Aerosoles en función de la Longitud de onda

En esta sección se estudiarán las variaciones espectrales del AOD utilizando la relación $\ln(\text{AOD})$ vs $\ln \lambda$. Las mediciones espectrales de AOD se analizaron en seis longitudes de onda, seleccionadas de la base del fotómetro solar CIMEL. La dependencia espectral se analizó para datos medidos en la temporada de primavera de cada uno de los 4 años (2005 – 2008) seleccionados para este estudio.

La figura 18 muestra una ligera curvatura en la relación $\ln(\text{AOD})$ frente a $\ln \lambda$, que depende tanto de la turbidez atmosférica como de las propiedades ópticas del aerosol (Kaskaoutis y Kambezidis, 2006). El sitio AERONET en Tuxtla Gutiérrez es un sitio urbano con períodos de fuertes cargas de aerosoles como resultado de la contaminación emitida por varias fuentes antropogénicas, como los procesos industriales y la combustión de combustibles fósiles del transporte vehicular.

Los datos en la figura 18 muestran curvaturas moderadas, que fueron ajustadas con funciones polinómicas de segundo orden, que proporcionan una buena aproximación. Estas curvaturas indican el predominio de partículas finas y son típicas de regiones afectadas por aerosoles generados por la quema de biomasa.

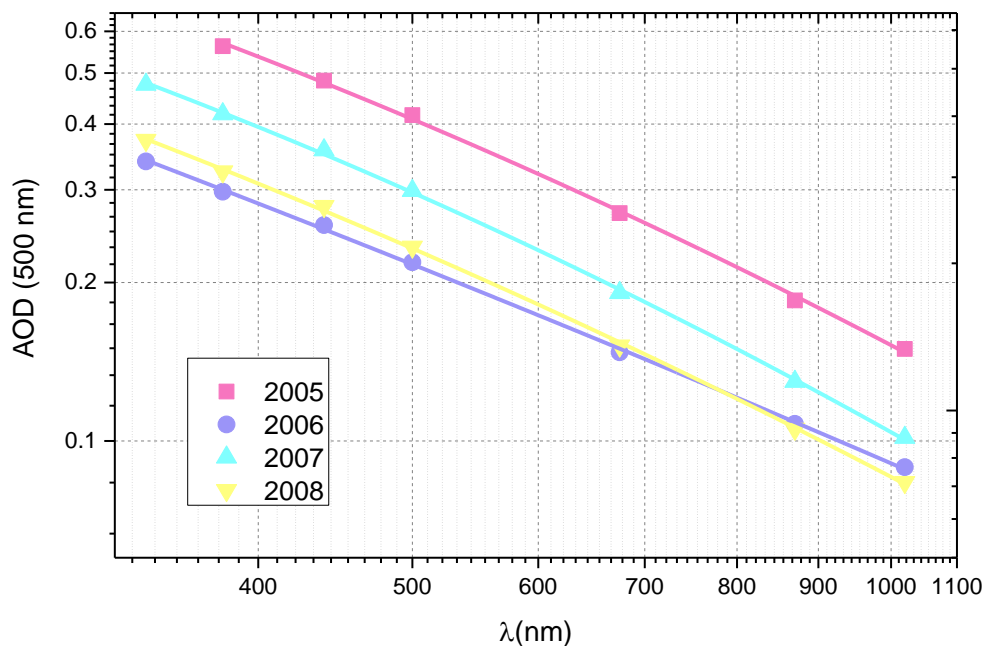


Figura 17: Dependencia del AOD en función de la longitud de onda (λ)

Las curvas para las tres estaciones verano, primavera y lluvias (figura 19), muestran un comportamiento similar: ambos muestran una dependencia paralela, con valores de AOD más altos para la primavera (línea roja-temporada de quemaduras de biomasa).

Los altos valores de la extinción en la primavera se deben probablemente a un aumento en la concentración de partículas durante el período de quema de biomasa.

La primavera es la temporada más seca y soleada en México, esta temporada se caracteriza por el predominio de cielos despejados, poca humedad y los vientos débiles que están asociados con los sistemas de alta presión.

Se observa un comportamiento diferente en la temporada de lluvias, ya que los datos presentan una curvatura más pronunciada, con valores de AOD más altos que en la temporada de verano, pero menores que en la temporada de primavera.

Los valores de AOD para la estación de lluvias pueden producirse debido a la nubosidad. Es importante mencionar que la curvatura de la relación $\ln AOD$ vs. $\ln \lambda$ depende fuertemente de las condiciones atmosféricas y del exponente Ångström (Eck et al., 1999; Pedrós et al., 2003).

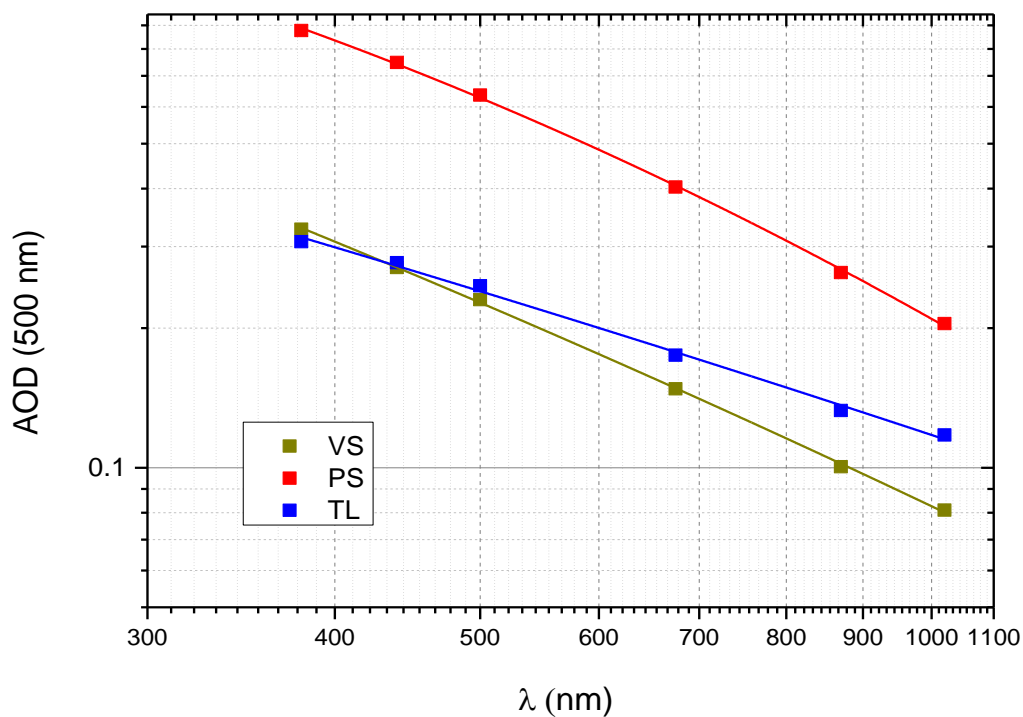


Figura 18: Dependencia del AOD con la longitud de onda para el año 2005, dividido en 3 épocas: VS, PS y TL.

En la figura 20 se presenta una comparación entre el comportamiento espectral del AOD medido en Tuxtla Gutiérrez, con el reportado para la quema de biomasa en las regiones tropicales de Zambia, África (estación Mongu) y en el Amazonas, Brasil (estación Abracos_Hill). Estos sitios se escogieron porque son representativos de zonas en donde se presentaron grandes quemadas de biomasa con un impacto global durante el año 2005.

La región del Amazonas y Tuxtla Gutiérrez muestran una tendencia bastante similar, indicando una extinción alta de la radiación. Por otro lado, África tiene valores más bajos, lo cual puede deberse al tipo de vegetación que se está quemando en cada sitio.

La composición de las partículas por quema de biomasa varía dependiendo de diferentes factores, como puede ser el tipo de vegetación, las condiciones meteorológicas en donde se encuentran, etc. Esta es una de las razones por la que encontramos diferencias significativas entre distintos sitios de quema de biomasa importantes en el mundo.

Generalmente en el sureste de México y en el Amazonas, los incendios se producen en bosques tropicales (compuestos de árboles de hasta 30 metros de alto o más de muy diversas especies, lianas, epífitas y palmas (SEMARNAT, 2017)), mientras que en África las quemaduras ocurren en pastos en sabanas extensas (pastos y arbusto de mediana altura).

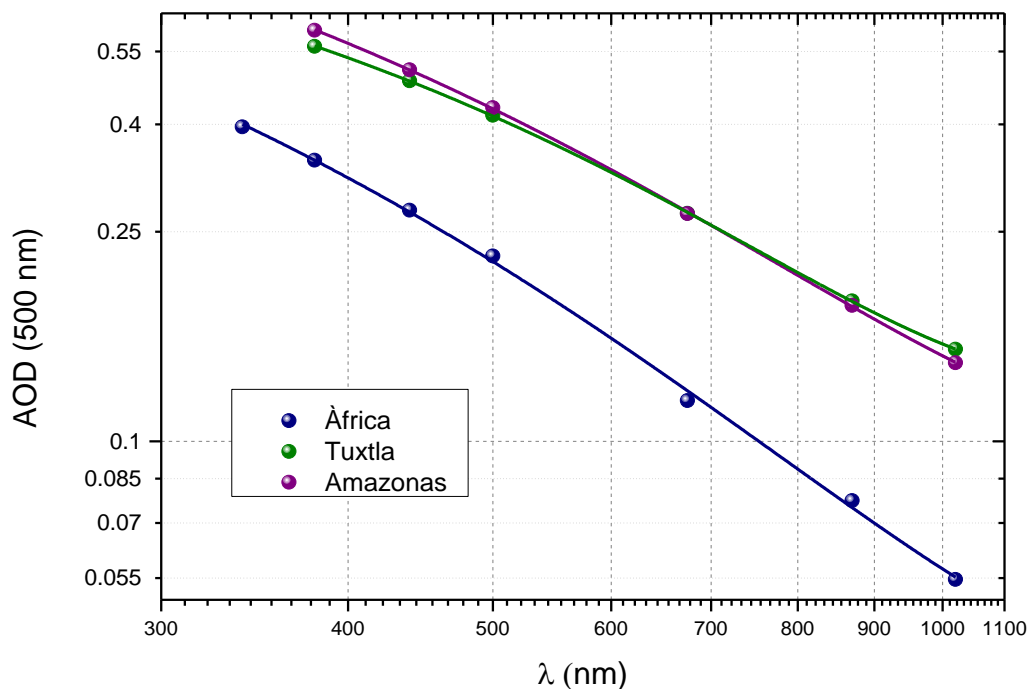


Figura 19: Comparación de AOD en función de la longitud de onda (λ) para África, Amazonas y nuestro sitio de estudio Tuxtla Gutiérrez; para el año 2005 en todos los casos.

3.5 Índice de Refracción

El índice de refracción es una propiedad física que describe cómo actúa la luz al incidir sobre un material, en este caso sobre los aerosoles. Está definido por la diferencia entre las velocidades de propagación de la luz en el vacío y en el material por donde viaja.

El índice de refracción es un número con parte real y con parte imaginaria y cada una tendrá un efecto distinto en la propagación. Si la parte real del índice de refracción de una partícula es alta, se incrementa la dispersión que se produce. Si la parte imaginaria

del índice de refracción de una partícula es alta, la partícula tiende a absorber radiación. Los aerosoles sufren cambios en su composición al estar en contacto con la atmósfera y esto lleva a que, con el tiempo en suspensión, cambien su composición química, lo cual se refleja en los valores del índice de refracción.

En la figura 21 se muestran los promedios de las componentes imaginaria (i) y real (R) del índice de refracción, de las partículas emitidas durante la primavera del 2005. Se debe mencionar que se calculó el promedio de todos los datos obtenidos debido a la baja cantidad de mediciones.

La parte real del índice de refracción de los aerosoles en Tuxtla Gutiérrez varía desde un valor mínimo de 1.42 (~440 nm) a un máximo de 1.43 (1020 nm). Mientras que la parte imaginaria presenta valores de 0.0073 (440 nm) y 0.0070 (1020 nm). Los valores reportados en este estudio coinciden con las mediciones del fotómetro Cimel reportadas por Yamasoe et al. (1998), para las quemas de biomasa en el Amazonas de Brasil.

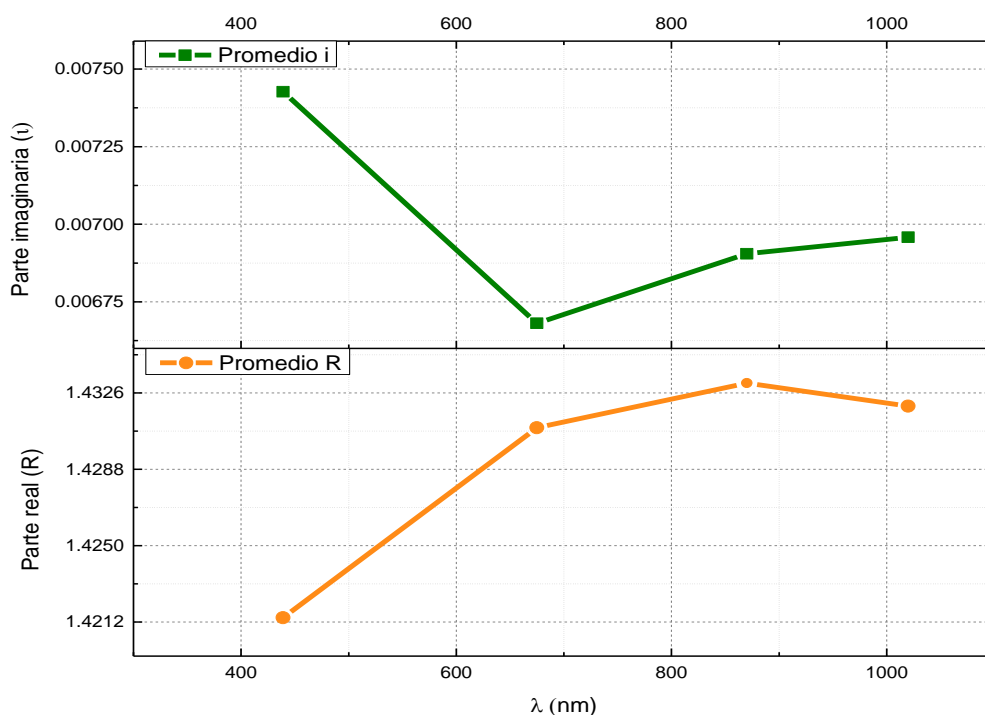


Figura 20: Índice de refracción de partículas emitidas en el sureste de México en 2005.

3.6 El albedo de dispersión simple

El albedo de dispersión simple (SSA, por sus siglas en inglés) es un parámetro que relaciona el coeficiente de dispersión con el coeficiente de extinción.

Este parámetro es muy usado para estudiar la dispersión de radiación por partículas pequeñas. El SSA es un parámetro adimensional, en donde un valor de $SSA = 1$ indica

que toda extinción de partículas se debe a la dispersión; por el contrario, un valor de $SSA = 0$ implica que toda extinción se debe a la absorción.

En este trabajo se estudió el SSA con el objetivo de conocer más sobre la naturaleza absorbente o dispersante de las partículas. Se graficó el albedo de dispersión simple en función de la longitud de onda ($\lambda = 439, 675, 870$ y 1020 nm). En la figura 22 se observa como decrece el valor de SSA al incrementar la longitud de onda.

En general se observan valores altos de SSA, indicando una mayor dispersión de radiación por las partículas. Los valores máximos se observan para el 2005, caso curioso ya que este es el año que presentó mayor concentración de aerosoles por quema de biomasa. Esto puede deberse al tiempo de duración de las quemas y a procesos de envejecimiento del aerosol, debido a factores como la humedad relativa de la zona.

La dependencia espectral del SSA se ha utilizado para inferir sobre la composición del aerosol. Se puede estimar el tipo de aerosol predominante en una mezcla estudiando el comportamiento del SSA en función de la longitud de onda.

Aquellas mezclas de aerosol en donde predomina la absorción por partículas de polvo presentan un incremento monótono del SSA con la longitud de onda, mientras que aquellas mezclas de aerosol dominadas por la absorción de carbono negro presentan un decrecimiento monótono en función de λ . Esta última tendencia es la que observamos en la figura 22, en donde se presenta el comportamiento del SSA para los años 2005, 2006 y 2007.

En casi todas las curvas se ve un decrecimiento de los valores del SSA, con excepción de la tendencia registrada para el año 2005, que muestra un pico en 675 nm.

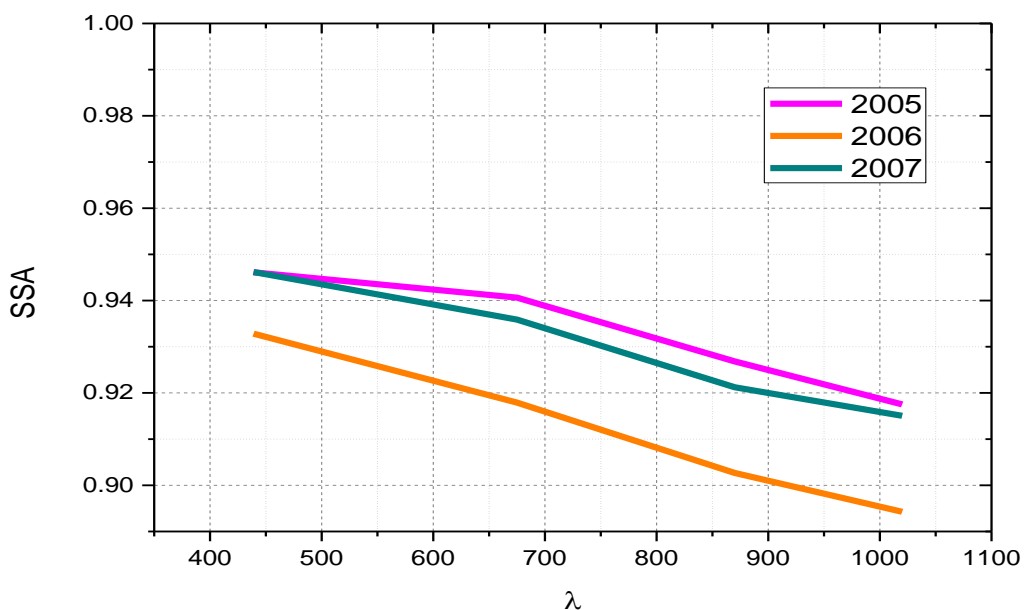


Figura 21: Albedo de dispersión simple y longitud de onda

3.7 Hysplit

El modelo “Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory” (HYSPPLIT) desarrollado por la NOAA’s Air Resources Laboratory (ARL) (Draxler and Hess, 1998), es un modelo matemático que trabaja de acuerdo a las condiciones en que se encuentra el sitio de estudio, tales como velocidad, dirección del viento y concentración de partículas, en un rango de dispersión vertical y horizontal (<http://www.noaa.gov/>).

El Hysplit se ha utilizado en esta tesis para el cálculo de las retro-trayectorias de masas de aire sobre la zona de monitoreo.

Las trayectorias son una herramienta muy útil en el análisis de los cambios en las concentraciones de gases traza y aerosol, ya que permiten la caracterización de las masas de aire que se desplazan hacia un observatorio determinado, ayudando a comprender dichos cambios.

Las trayectorias se definen como la integración en el tiempo de la posición de una parcela de aire que es transportada por el viento. Esta integral se puede resolver tanto hacia adelante como hacia atrás en el tiempo, siendo estas últimas las que se denominan retro-trayectorias.

Las retro-trayectorias que se presentan en la figura 23, corresponden a masas de aire, arribando en 4 diferentes días, durante primavera (quemadas de biomasa) en diferentes años (02/03/05; 08/05/05; 07/04/06; 11/04/07).

En este estudio, se analizaron estos días porque muestran trayectorias procedentes desde diferentes direcciones: en la figura 23a se observan las trayectorias de la fecha 02/03/05 provenientes del este. Estas masas proceden desde el Golfo de México y entran al continente atravesando la parte norte de Yucatán hasta arribar a Chiapas.

Las masas de aire registradas en el día 08/05/05 (figura 23 b), provienen del sur. Estas masas, principalmente aquellas con altitud de 1000 y 1500 m, vienen desde el Mar Caribe atravesando Belice y Guatemala.

Las retro-trayectorias observadas para el día 07/04/06 (fig. 23 c), corresponden a masas de aire que se originan en Yucatán y en su recorrido atraviesan parte de Guatemala hasta llegar a Chiapas entrando por el oeste.

Finalmente, las trayectorias registradas para el día 11/04/07 (fig. 23 d) representan las trayectorias de masas arribando desde el oeste. Estas masas se proceden desde el Océano Pacífico y entran al continente atravesando Chiapas.

Los datos de las propiedades ópticas de estas masas de aire fueron obtenidos por el fotómetro solar y los análisis muestran interesantes resultados. La tabla 3 muestra el promedio de AOD y el tamaño para cada uno de los días analizados.

Se observa que las masas de aire del día 08/05/05 (fig. 23 b) que arriban por el sur del país (atravesando Belice y Guatemala) presentan los valores más altos del AOD, con un valor promedio medido de 1.13.

El tamaño promedio de las partículas registrado para esas masas de aire fue de 0.12 μm , lo cual muestra la presencia de aerosoles muy finos (tamaños pequeños).

Todo lo anterior indica que la atmósfera en el suroeste de México puede ser afectada por las intensas quemadas de biomasa generadas en las selvas tropicales en América Central (Belice y Guatemala).

Este transporte regional de contaminantes, generados en las quemadas, produce una alta concentración de partículas con tamaños muy finos que afectaron significativamente la profundidad óptica (AOD).

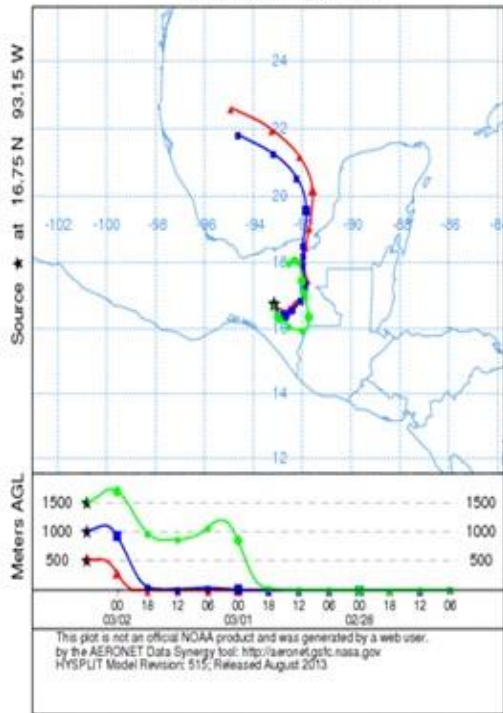
Por otro lado, se observa que en el día 11/04/07 (figura 23 d) se registraron los valores más bajos del AOD, con un valor promedio de 0.15. Las masas de aire que arribaron a Chiapas en ese día provenían directamente desde el Océano Pacífico, sin atravesar otras regiones continentales que afectarían su composición. Lo anterior muestra la ausencia de partículas absorbentes e indicaría la presencia de aerosoles salinos.

Por otro lado, los valores más altos del AOD se midieron el 8 de mayo de 2005, con valores alrededor de $\tau=1.11$. La retro- trayectoria de las masas de aire indican un transporte desde el este, atravesando Belice, donde también ocurren fuertes quemadas de biomasa. Durante el transporte estas partículas pueden sufrir procesos de envejecimiento, lo que aumentaría su coeficiente de absorción.

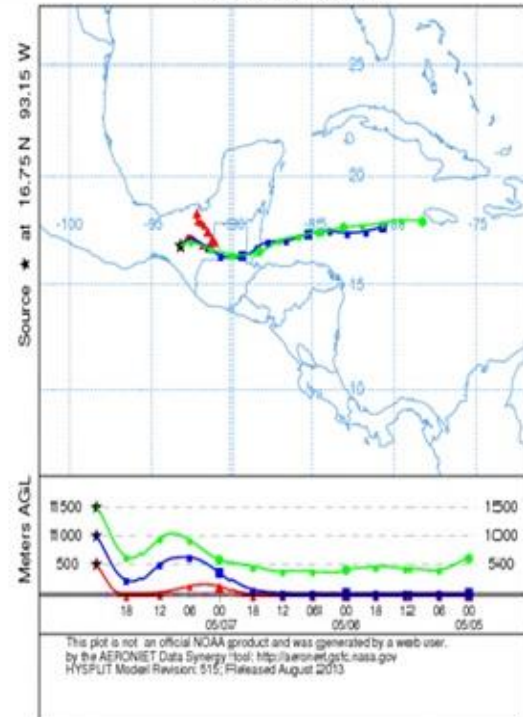
Tabla 3 Promedios de AOD y tamaño para cada día analizado.

Fecha	AOD	Tamaño (μm)
02 marzo 2005	0.43	0.05
08 mayo 2005	1.13	0.12
07 abril 2006	0.32	0.05
11 abril 2007	0.15	0.02

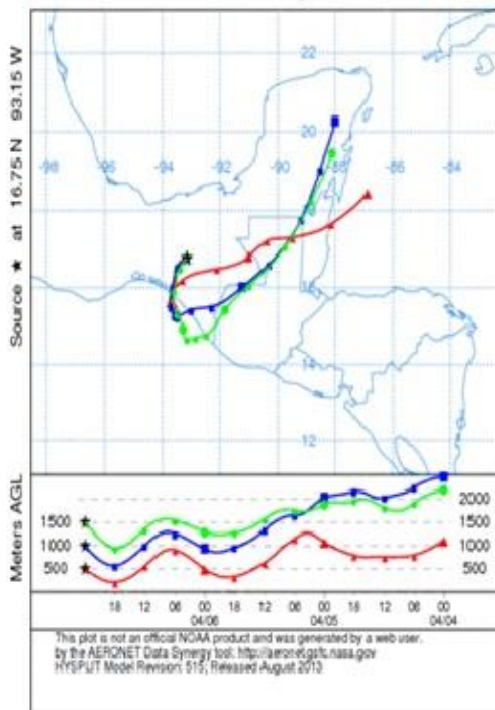
(a) NOAA HYSPLIT MODEL - NASA/AERONET Run
Backward trajectories ending at 0600 UTC 02 Mar 05
GDAS Meteorological Data



(b) NOAA HYSPLIT MODEL - NASA/AERONET Run
Backward trajectories ending at 0000 UTC 08 May 05
GDAS Meteorological Data



(c) NOAA HYSPLIT MODEL - NASA/AERONET Run
Backward trajectories ending at 0000 UTC 07 Apr 06
GDAS Meteorological Data



(d) NOAA HYSPLIT MODEL - NASA/AERONET Run
Backward trajectories ending at 0600 UTC 11 Apr 07
GDAS Meteorological Data

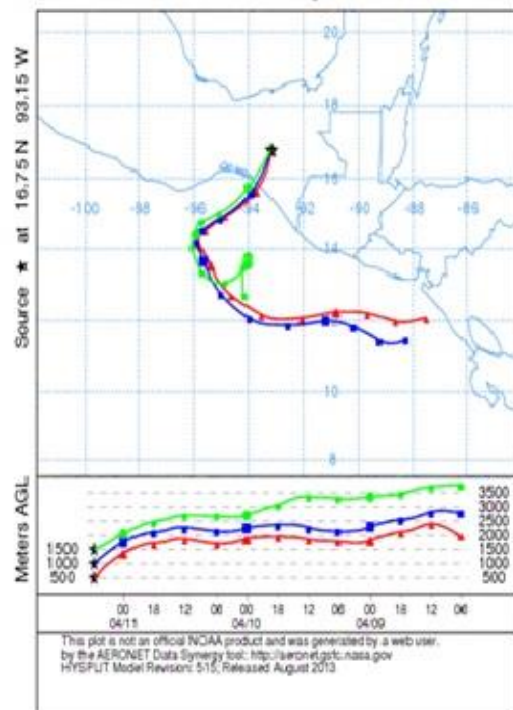
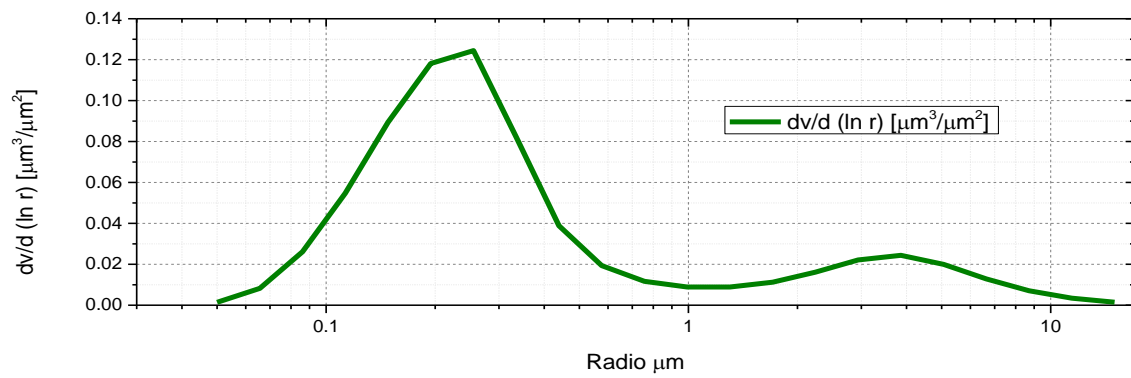
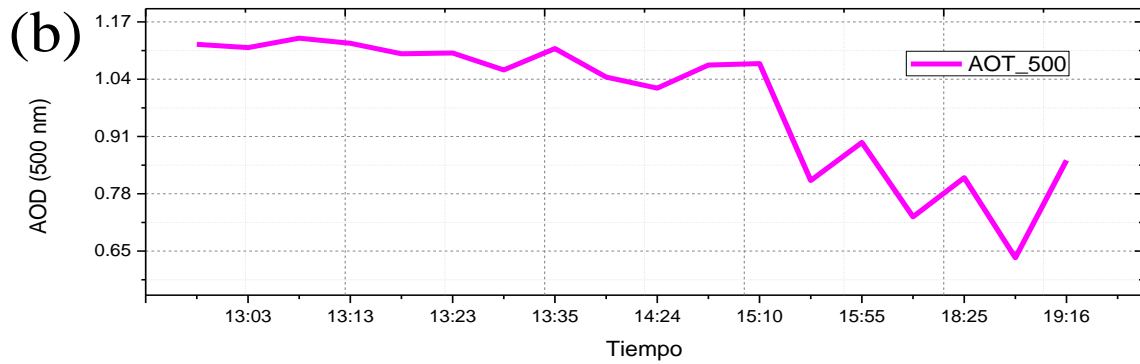
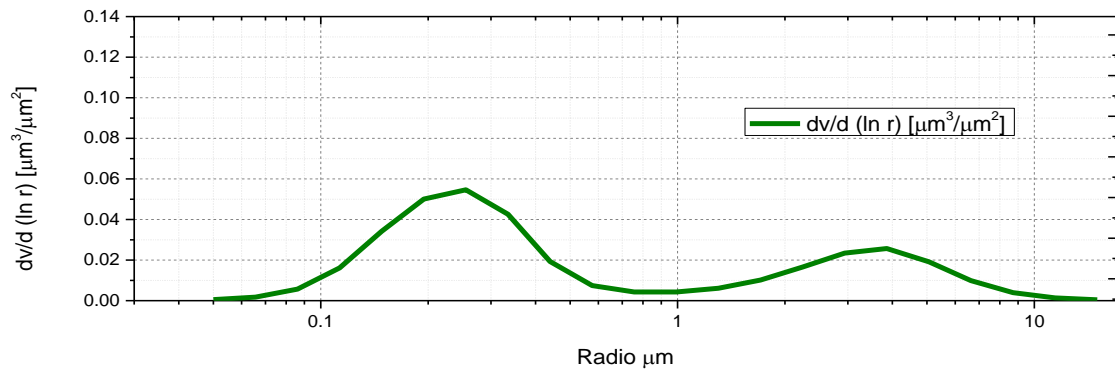
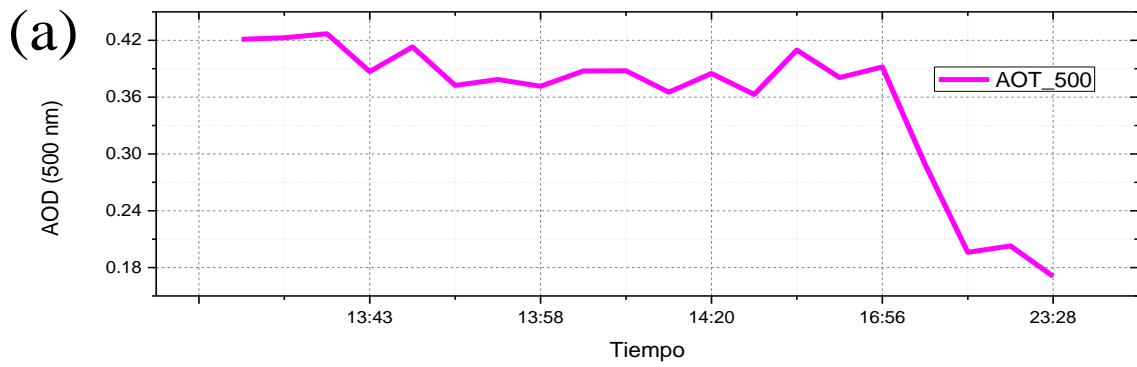


Figura 22: Retro-trayectorias Hysplit para Tuxtla Gutiérrez, desde diferentes ubicaciones en diferentes días.



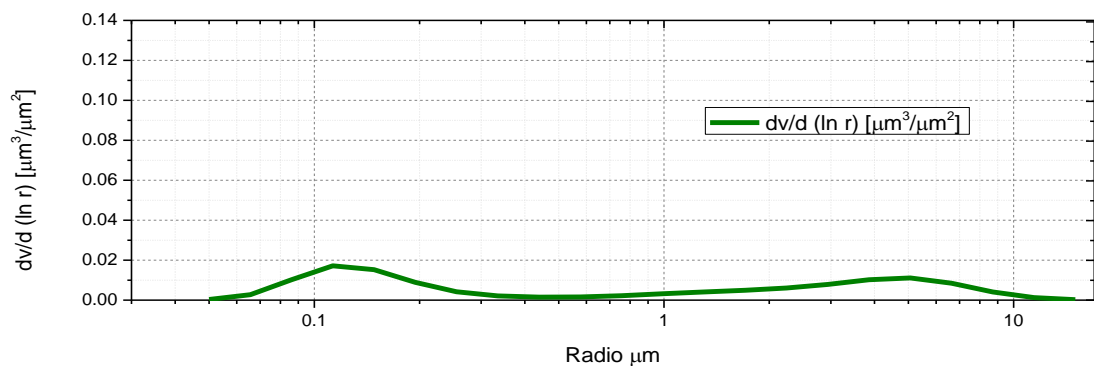
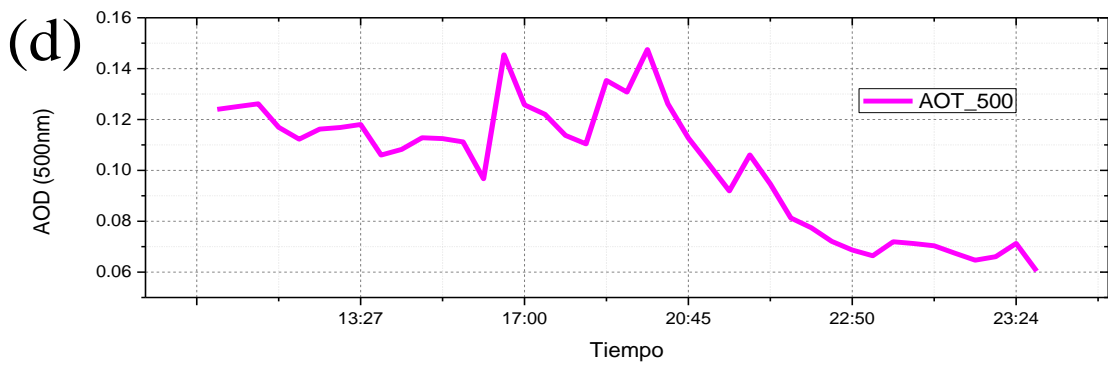
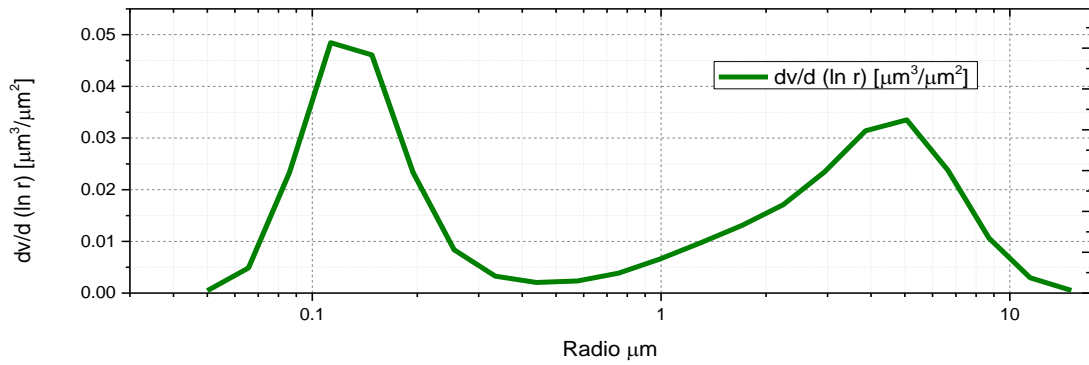
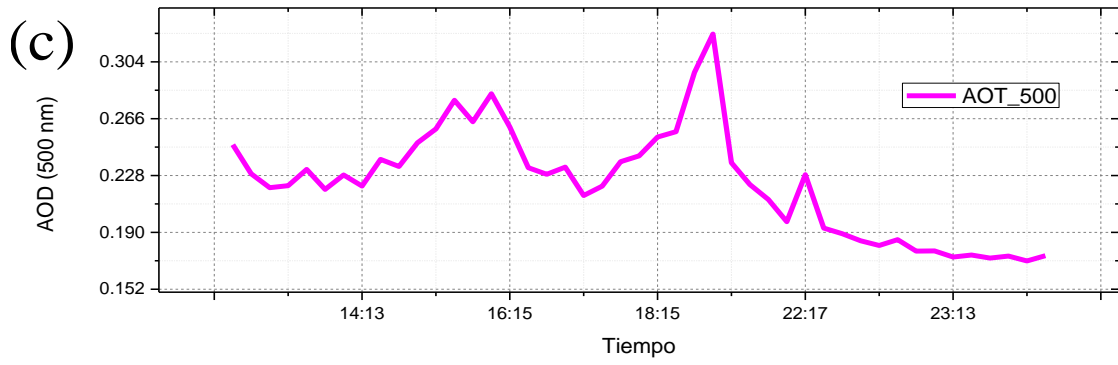


Figura 23: AOD y distribución de tamaño por día de acuerdo a HYSPLIT.

3.8 Diagrama de clasificación de aerosoles

En la Figura 25 se presentan dos esquemas usados para clasificar las propiedades ópticas de los aerosoles, utilizando las observaciones directas del fotómetro solar en el sitio AERONET en Tuxtla Gutiérrez. Para construir el esquema se emplearon 21,478 mediciones distribuidas en un período de 6 años (2005 - 2010). Las partículas de aerosol se han clasificado aplicando el método de dispersión descrito por Gobbi et al, (2007). En este método se grafica la diferencia del exponente Ångström $\delta\alpha = \alpha(440, 675) - \alpha(675, 870)$ versus la longitud de onda de cada medición ($d\alpha / d\lambda$).

En el esquema, los puntos se grafican con diferentes colores que corresponden a los diferentes valores del AOD: punto rosa para $0.3 > \text{AOD} > 0.15$; punto verde menta para $0.40 > \text{AOD} > 0.30$; punto azul para $0.70 > \text{AOD} > 0.40$, punto verde para $1.0 > \text{AOD} > 0.7$; punto rojo para $1.5 > \text{AOD} > 1.0$; y punto negro para $2.0 > \text{AOD} > 1.5$. Las líneas continuas negras representan un tamaño determinado del modo fino (R_f) de los aerosoles y las líneas discontinuas azules indican la contribución total o fracción (η) del modo fino.

Kaufman (1993) demostró que los valores negativos de $\delta\alpha$ indican el predominio de aerosoles de modo fino, mientras que las diferencias positivas indican el efecto de dos modos (fino y grueso). Gobbi et al. (2007) se basaron en este concepto y propusieron un nuevo método de clasificación de aerosoles para clasificar partículas de acuerdo con su tamaño y valor de AOD.

En esta tesis se empleó este método para clasificar el aerosol medido por el fotómetro solar en Tuxtla Gutiérrez. Para estudiar las propiedades ópticas de los aerosoles generados por las quemas de biomasa, los datos se analizaron usando dos períodos: meses sin quema de biomasa (SQB) y meses con quemas (QB), representados en las figuras 25 (a) y (b), respectivamente.

La Figura 25 (a) muestra la clasificación de los aerosoles durante los meses que no son quema de biomasa (SQB). En esta figura, la mayoría de los datos (puntos azules) con $0.3 > \text{AOD} > 0.15$ (valores bajos) se mueven a lo largo de la línea negra de $R_f = 0.10 \mu\text{m}$ con una contribución η de $\sim 70\%$. Estos datos también muestran una ligera tendencia a ramificarse hacia tamaños de R_f más pequeños ($< 0.10 \mu\text{m}$), que evidencian partículas finas de origen antropogénico. La figura 25 (a) también evidencia la presencia de aerosoles en el modo grueso, ya que una fracción significativa de los datos ($< 50\%$) se agrupa alrededor de los valores con $d\alpha$ positivos ($0,4 > d\alpha > 0$).

La Figura 25 (b) muestra la clasificación de aerosoles durante los meses quema de biomasa (QB, primavera). Los datos se agrupan alrededor de valores negativos ($0 > d\alpha > -0.5$), lo cual indica el predominio de aerosoles de modo fino. La mayoría de las partículas con $\text{AOD} < 0.4$ (bajos valores) se mueven a lo largo de la línea negra de $R_f = 0.10 \mu\text{m}$ (menores tamaños) con una contribución $\eta > \sim 70\%$. Mientras que los datos con valores altos de AOD (> 1.5), se alinean alrededor de $R_f = 0.15 \mu\text{m}$. Este aumento

significativo de AOD con Rf, podría estar asociado con el proceso de envejecimiento y / o coagulación.

Es importante mencionar que en la figura 25 (b), los datos con AOD > 1.5 (puntos negros y rojos) y moviéndose a lo largo de Rf = 0.15 μ m, son de especial interés porque pueden asociarse a la presencia de partículas altamente absorbentes.

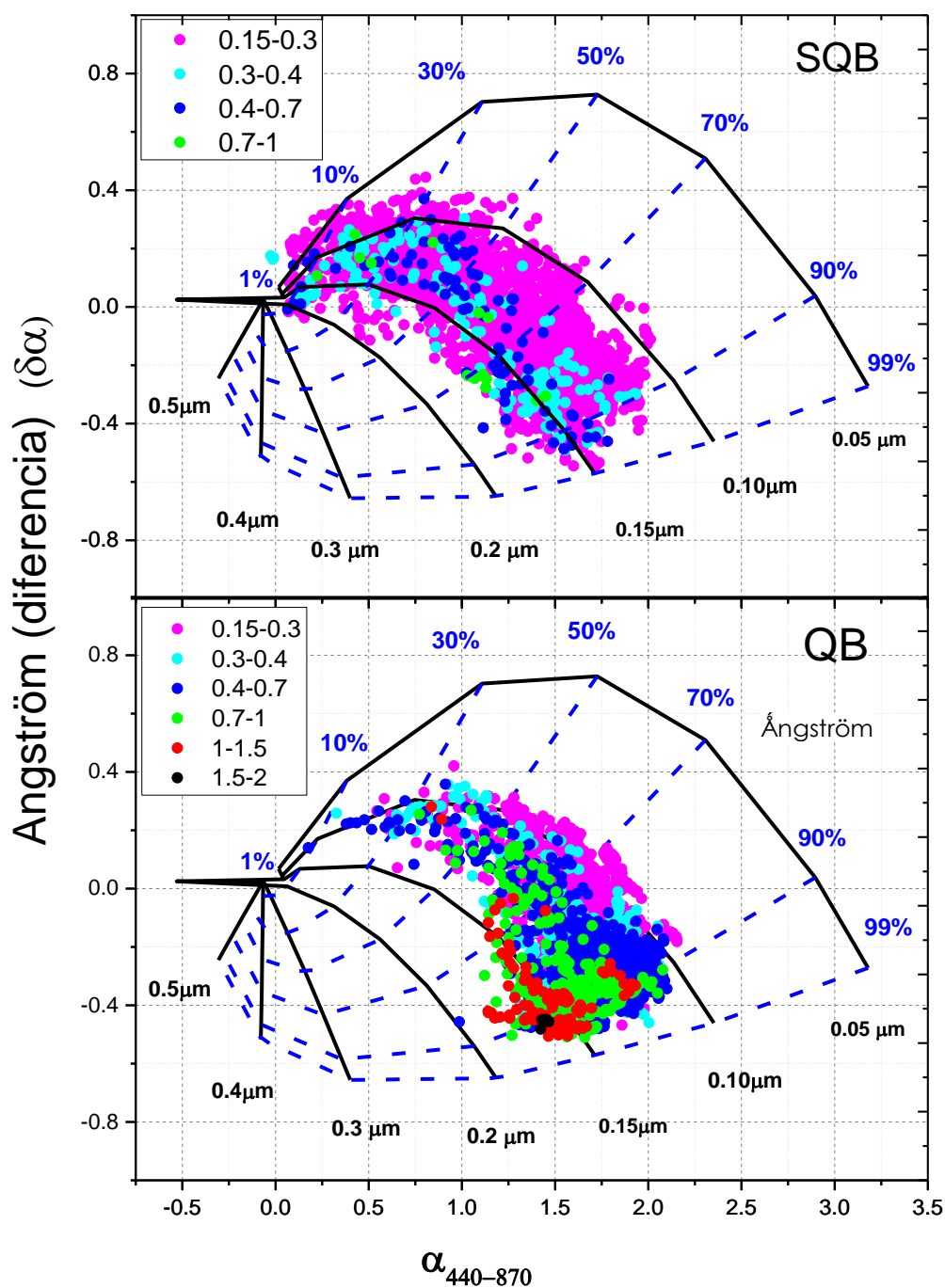


Figura 24: Diagrama de clasificación de aerosoles basado en la teoría de Gobbi et al., (2007). Se muestra la clasificación en dos temporadas: con y sin quema de biomasa.

4 Conclusiones

Este estudio constituye una aportación importante al conocimiento sobre los efectos de los aerosoles por quema de biomasa, ya que no se cuenta con estudios de este tipo realizados en el sureste de México. La caracterización de estas partículas es de gran importancia por los efectos adversos que causan a la salud y al medio ambiente.

En este trabajo, las quemas de biomasa durante la temporada de primavera desde 2005 al 2008 en el sureste de México, se analizaron empleando las imágenes del sensor MODIS. Estas imágenes evidencian un cambio en los patrones de los incendios forestales a través de los años.

La región de incidencia de los incendios se debe principalmente a la influencia de habitantes en la zona. Las imágenes muestran que los incendios aparecen en zonas rurales con una presencia significativa de población. Adicionalmente las imágenes demuestran un aumento gradual en la frecuencia y distribución de los incendios.

Si bien la mayoría de los incendios se producen en la Península de Yucatán, existe una fuerte influencia de la quema ocurrida en otras regiones de México (Campeche y Quintana Roo), pero principalmente de países centroamericanos como Guatemala y Belice.

Este trabajo está basado principalmente en el estudio de las propiedades ópticas de los aerosoles sobre el Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Los resultados están basados en el análisis de una base de datos de 4 años (2005 - 2008) de mediciones realizadas por el fotómetro solar CIMEL, que pertenece a AERONET.

Los resultados muestran altos valores del AOD que ocurren principalmente durante la época de quemas de biomasa (en la primavera). En otras estaciones del año, el AOD muestra valores bajos, que se pueden deber a las emisiones locales de la zona urbana de la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez.

A continuación, se resaltan las conclusiones más importantes que se obtuvieron de estudiar los parámetros ópticos de los aerosoles en el sureste de México:

- ❖ El análisis general de AOD y α nos indica que los años 2005 y 2007 son los que presentan los valores más altos. Esto indica que posiblemente fueron los años en los que ocurrieron una mayor cantidad de quemas, que igualmente pudieron ser más intensas.
- ❖ La alta concentración de partículas finas durante la primavera en algunas regiones del sureste de México evidenció el efecto adverso de las quemas de biomasa en esa región del país.
- ❖ Los aerosoles medidos en Tuxtla Gutiérrez presentan valores bajos del índice de refracción, lo cual coincide con los valores altos del albedo de dispersión. Este comportamiento podría deberse a la presencia de aerosoles envejecidos, transportados desde otras zonas con quemas de biomasa (Yucatán, Guatemala o Belice).

- ❖ El comportamiento espectral de albedo de dispersión simple (SSA) muestra cómo sus valores decrecen en función de la longitud de onda. Esto indica que, en esa mezcla de aerosoles, la absorción se debe principalmente a la presencia de carbono negro.
- ❖ Del análisis simultáneo de las retro-trayectorias (modelo HYSPLIT) y del comportamiento del AOD, se concluyó que puede existir un transporte de masas de aire contaminadas con emisiones de quemadas de biomasa generadas en Belice y Guatemala.

En esta tesis, también se realizó una comparación de los parámetros ópticos obtenidos para las quemadas de biomasa en el sureste de México con las mediciones reportadas para incendios ocurridos en otras regiones tropicales (Zambia y Brasil). La región del Amazonas y Tuxtla Gutiérrez muestran una tendencia espectral del AOD similar. Las quemadas de biomasa en Zambia, África muestra valores más bajos, que pueden deberse al tipo de vegetación que se quema.

5 Referencias

- Alegría-Campos D.L. (2015), Propiedades microfísicas de los aerosoles troposféricos derivadas de medidas de fotómetro solar y lidar en el valle de Aburrá, Tesis de investigación, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Medellín, Colombia. (<http://www.bdigital.unal.edu.co/49674/>).
- Andreae M. O y Merlet P. (2001). Emission of trace gases and aerosols from biomass burnig. *Global Biogeochemical Cycles*. 15, 955-966.
- Área de Teledetección. Fotómetro solar CIMEL 318-NE. Dpto. De observación de la Tierra. Teledetección y Atmósfera. INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial) (<http://crepadweb.cec.inta.es/es/npoc/tratamiento-CIMEL318-NE.html>)
- Balán-Pérez R.A. (2013). Estudio del contenido de hidrocarburos policíclicos aromáticos y metales en partículas atmosféricas de diferentes diámetros aerodinámicos de La Comarca Lagunera, México. Diciembre 2017, Tesis de Doctorado. Sitio web: <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/898/1/%27Román%20Alberto%20Pérez%20Balán%20Doctorado%20en%20Ciencia%20y%20Tecnología%20Ambiental.pdf>
- Becerra, J. X. (2005). Timing the origin and expansion of the Mexican tropical dry forest. *PNAS*, 102, 10919-10923.
- Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., DeAngelo, B. J., and Kinne, S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 5380-5552.
- Bond, T.C., Streets, D.G., Yarber, K.F., Nelson, S.M., Woo, J.H., & Klimont, Z. (2004). A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D14).
- Challenger, A., and Soberón, J. (2008). Los ecosistemas terrestres. *Capital natural de México*, 1, 87-108.
- Chen, J., Li, C., Ristovski, Z., Milic, A., Gu, Y., Islam, M. S. and Guo, H. (2017). A review of biomass burning: Emissions and impacts on air quality, health and climate in China. *Science of the Total Environment*, 579, 1000-1034.
- CONABIO (2010), Sistema de Alerta Temprana de Incendios Forestales, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- CONAFOR, 2005; 2012. Comisión Nacional Forestal, Sistema Nacional de Información Forestal. <https://www.gob.mx/conafor>
- Cortés-Hernández, V. E., Aparicio, J. (2014). Caracterización de aerosoles por quema de biomasa en el sureste de México, *Tecnología y Ciencia del Agua*, 5, 145-156.
- Crounse, J. D., DeCarlo, P. F., Blake, D. R., Emmons, L. K., Campos, T. L., Apel, E. C., and Jimenez, J. L. (2009). Biomass burning and urban air pollution

- over the Central Mexican Plateau. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(14), 4929-4944.
- Crutzen P.J. y Andreae M.O. (1990). Biomass burning in the tropics: Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. *Science*. 250,1669-1678.
 - de Foy, B., Caetano, E., Magaña, V., Zitácuaro, A., Cardenas, B., Retama., A., Ramos, R., Molina, LT., Molina, MJ., (2005). Mexico City basin wind circulation during the MCMA-2003 field campaign. *Atmos. Chem. Phys.* 5, 2267-2288. <http://dx.doi.org/10.5194/acp-5-2267-2005>.
 - Draxler, R. R., & Hess, G. D. (1998). An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories. *Australian Meteorological Magazine*, 47(4), 295-308.
 - Draxler, R.R., andd Rolph, G.D., (2005). HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model Access via NOAA ARL READY Website (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
 - Dubovik, O., Holben, B., Eck, T. F., Smirnov, A., Kaufman, Y. J., King, M. D., and Slutsker, I. (2002). Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations. *Journal of the atmospheric sciences*, 59(3), 590-608.
 - Eastern R.C. y Peter L.K. (1994). Binary homogeneous nucleation: temperature and relative humidity fluctuations, nonlinearity, and aspects of new particles production in the atmosphere. *Journal of Applied Meteorology*, 33, 775-784.
 - Eck, T.F., Holben, B.N., Reid, J.S., Dubovik, O., Smirnov, A., O'Neill, N.T., Slutsker, I., Kinne, S., (1999). Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols. *Journal of Geophysical Research*, 104, 31,333 – 31,349. (<http://dx.doi.org/10.1029/1999JD900923>).
 - Falkowski, T.B., Diemont, S.A., Chankin, A., Douterlungne, D., (2016). Lacandon Maya traditional ecological knowledge and rainforest restoration: soil fertility beneath six agroforestry system trees. *Ecol. Eng.* 92, 210–217
 - Galanter, M., Levy, H., & Carmichael, G. R. (2000). Impacts of biomass burning on tropospheric CO, NO_x, and O₃. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D5), 6633-6653.
 - Gobbi, G. P., Kaufman, Y. J., Koren, I., & Eck, T. F. (2007). Classification of aerosol properties derived from AERONET direct sun data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, 453-458.
 - Gómez-Amo, J. L., Martínez-Lozano, J. A., Utrillas, M. P., Pedrós, R., and Estellés, V. (2006). Column-integrated aerosol optical properties in Sodankylä (Finland) during the Solar Induced Fluorescence Experiment (SIFLEX-2002). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D5).
 - Hansen, J., Johnson, D., Lacis, A., Lebedeff, S., Lee, P., Rind, D., & Russell, G. (1981). Climate impact of increasing atmospheric carbon dioxide. *Science*, 213(4511), 957-966.

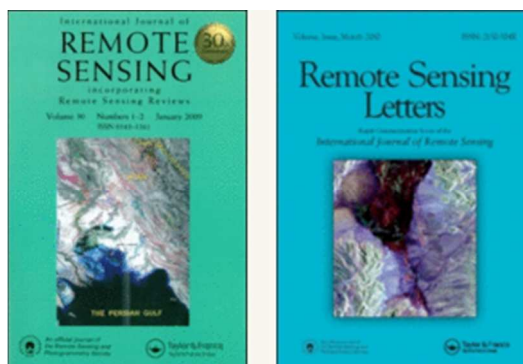
- Hobbs, P. V., Reid, J. S., Kotchenruther, R. A., Ferek, R. J., & Weiss, R. (1997). Direct radiative forcing by smoke from biomass burning. *Science*, 275(5307), 1777-1778.
- Holben, B. N., Eck, T. F., Slutsker, I., Tanre, D., Buis, J. P., Setzer, A., and Lavenu, F. (1998). AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote sensing of environment*, 66(1), 1-16.
http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/pdf/programas_manejo/montes_azules.pdf.
- Holben, B. N., Tanre, D., Smirnov, A., Eck, T. F., Slutsker, I., Abuhassan, N., and Kaufman, Y. J. (2001). An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D11), 12067-12097.
- In, H. J., Byun, D. W., Park, R. J., Moon, N. K., Kim, S., & Zhong, S. (2007). Impact of transboundary transport of carbonaceous aerosols on the regional air quality in the United States: A case study of the South American wildland fire of May 1998. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D7).
- INE, (2000). National Institute of Ecology (Instituto Nacional de Ecología). Programa de manejo de la Reserva de la Biosfera Montes Azules. México, (<http://www.paot.mx/centro/ine-semarnat/anp/AN29.pdf>).
- INEGI, 2018. National Institute of Statistics and Geography (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). <http://www.inegi.org.mx>.
- Jacob, D. J., Heikes, E. G., Fan, S. M., Logan, J. A., Mauzerall, D. L., Bradshaw, J. D., and Sachse, G. W. (1996). Origin of ozone and NO_x in the tropical troposphere: A photochemical analysis of aircraft observations over the South Atlantic basin. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 101(D19), 24235-24250.
- Jacobson, M.c., Hansoon H.C, Noone and Charlson R. J (2000). Organic Atmospheric Aerosols: Review and state of the science. *Reviews of Geophysics*. 38, 267-294.
- Jacobson, M.Z. (2002). Frontmatter. In *Atmospheric Pollution: History, Science, and Regulation* (pp. I-IV). Cambridge: Cambridge University Press.
- Jáuregui, E. (2002). The climate of the Mexico City Air Basin: Its effects on the formation and transport of pollutants. In *Urban Air Pollution and Forests* (pp. 86-117). Springer, New York, NY.
- Kaskaoutis, D. G., and Kambezidis, H. D. (2006). Investigation into the wavelength dependence of the aerosol optical depth in the Athens area. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 132, 2217-2234.
- Kaufman, Y. J. (1990, May). Measurements of the aerosol optical thickness and the path radiance-implication on aerosol remote sensing and atmospheric corrections. In: *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1990. IGARSS'90. Remote Sensing Science for the Nineties'*, 10th Annual International (pp. 1023-1026). IEEE.

- Kotchenruther, R. A., and P. V. Hobbs, (1998). Humidification factors of aerosols from biomass burning in Brazil. *J. Geophys. Res.*, 103, 32 081–32 089.
- Kreidenweis, S. M., Remer, L. A., Bruintjes, R., & Dubovik, O. (2001). Smoke aerosol from biomass burning in Mexico: Hygroscopic smoke optical model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D5), 4831-4844.
- Kulmala, M., Maso, M. D., Mäkelä, J. M., Pirjola, L., Väkevä, M., Aalto, P., and O'dowd, C. D. (2001). On the formation, growth and composition of nucleation mode particles. *Tellus B*, 53(4), 479-490.
- Langner, J., Rodhe, H., Crutzen, P. J., & Zimmermann, P. (1992). Anthropogenic influence on the distribution of tropospheric sulphate aerosol. *Nature*, 359(6397), 712.
- Liu, C., Chung, C. E., Zhang, F. & Yin, Y (2016). The colors of biomass burning aerosols in the atmosphere. *Scientific Reports* 6, 28267.
- Matter U, Siegmann H.C. y Burtcher H, (1999). Dynamic field measurements of submicron particles from diesel engines. *Environmental Science and Technology* 33, 1946-1952.
- Mehlmann, A., & Warneck, P. (1995). Atmospheric gaseous HNO₃, particulate nitrate, and aerosol size distributions of major ionic species at a rural site in western Germany. *Atmospheric Environment*, 29(17), 2359-2373.
- Mielnicki D.M., Canziani P.O., Drummond J. (2005). Quema de biomasa en el centro-sur de sudamérica: incendios locales, impactos regionales, Programa de Estudio de los Procesos Atmosféricos en el Cambio Global, Universidad Católica Argentina.
- Pedrós, R., Martínez-Lozano, J.A., Utrillas, M.P., Gómez-Amo, J.L., Tena, F., (2003). Column-integrated aerosol, optical properties from ground-based spectroradiometer measurements at Barrax (Spain) during the digital airborne imaging spectrometer experiment (DAISEX) campaigns. *J. Geophys. Res.* 108 (D18), 4571–4587
- Penner, J. E., Dickinson, R. E., & O'Neill, C. A. (1992). Effects of aerosol from biomass burning on the global radiation budget. *Science*, 256(5062), 1432-1434.
- Pereira, E.B., Setzer, A.W., Gerab, F., Artaxo, P.E., Pereira, M.C. and Monroe, G. (1996). Airborne measurements of aerosols from burning biomass in Brazil related to the trace a experiment. *Journal of Geophysical Research* 101: doi: 10.1029/96JD00098. issn: 0148-0227.
- Querol, X., Alastuey, A., Rodriguez, S., Plana, F., Ruiz, C. R., Cots, N., and Puig, O. (2001). PM₁₀ and PM_{2.5} source apportionment in the Barcelona Metropolitan area, Catalonia, Spain. *Atmospheric Environment*, 35(36), 6407-6419.
- Reid, J. S., Hobbs, P. V., Ferek, R. J., Blake, D. R., Martins, J. V., Dunlap, M. R., & Liousse, C. (1998). Physical, chemical, and optical properties of regional hazes dominated by smoke in Brazil. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D24), 32059-32080.

- Rothman, L. S., Gamache, R. R., Barbe, A., Goldman, A., Gillis, J. R., Brown, L. R., and Camy-Peyret, C. (1983). AFGL Atmospheric Absorption Line Parameters Compilation: 1982 Edition. *Applied Optics*, 22(15), 2247-2256.
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (1998). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. New York; Wiley.
- SEMARNAT, 2017. Bosques tropicales, ecosistemas con gran riqueza de especies. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (<https://www.gob.mx/semarnat/articulos/bosques-tropicales-ecosistemas-con-gran-riqueza-de-especies?idiom=es>)
- Servir, (2003). Modelo Hysplit para trayectorias de masas de aire. Centro del Agua del Tropicó Húmedo para América Latina y el Caribe CATHALAC. {<http://www.servir.net/haiti-earthquake-2010/69-smog-blog-help-files/393-modelo-hysplit-para-trayectorias-de-masas-de-aire.html>}
- Shan W., Yin, Y., Lu, H., and Liang, S. (2009). A meteorological analysis of ozone episodes using HYSPLIT model and surface data. *Atmospheric Research*, 93, 767-776.
- Takemura T., and Nakajima, T. (2001). Single-scattering albedo and radiative forcing of various aerosol species with a global three-dimensional model. *Journal of Climate*. 15, 333-352.
- U.S. EPA. Air Quality Criteria for Particulate Matter (Final Report, 2004). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA 600/P-99/002aF-bF, 2004.
- Wallace J.M. and Hobbs P.V. (2006). *Atmospheric Science an Introductory Survey Second Edition Volumen 92 International Geophysics Series Elsevier*.
- Wallack J. S and Ramanathan V. (2009). The other climate changers: Why black carbon and ozone also matter. *Foreign Affairs*. 88 No.5, 105-113.
- Yamasoe, M. A., Kaufman, Y. J., Dubovik, O., Remer, L. A., Holben, B. N., and Artaxo, P. (1998). Retrieval of the real part of the refractive index of smoke particles from Sun/sky measurements during SCAR-B, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 103, 31893–31902, 1998.
- Yokelson, R. J., Crouse, J. D., DeCarlo, P. F., Karl, T., Urbanski, S. P., Atlas, E., and Weinheimer, A. (2009). Emissions from biomass burning in the Yucatan. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(15), 5785.

6 Anexos

A.1 Artículo en proceso de publicación con algunos resultados de esta tesis.



Aerosol optical properties and biomass burning emissions in southeastern Mexico during the period 2005–2009

Journal:	<i>International Journal of Remote Sensing</i>
Manuscript ID	Draft
Manuscript Type:	IJRS Research Paper
Date Submitted by the Author:	n/a
Complete List of Authors:	Carabali, Giovanni; Universidad Nacional Autonoma de Mexico Instituto de Geofisica, Radiación Solar RIOS, BLANCA; Universidad Nacional Autonoma de Mexico, CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMOSFERA Flores-Cruz, Claudia ; Universidad Nacional Autonoma de Mexico, CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMOSFERA Estévez, Hector; Universidad Nacional Autonoma de Mexico Instituto de Geofisica, Radiación Solar Valdes-Barrón, Mauro; Universidad Nacional Autonoma de Mexico Instituto de Geofisica, Radiación Solar Bonifaz, Roberto; Universidad Nacional Autonoma de Mexico Instituto de Geofisica, Radiación Solar Riveros-Rosas, David; Universidad Nacional Autonoma de Mexico Instituto de Geofisica, Radiación Solar
Keywords:	aerosols, aeronet, Biomass burning, MODIS
Keywords (user defined):	Aerosol optical depth, Atmospheric Chemistry

SCHOLARONE™
Manuscripts

1
2
3
4 **Aerosol optical properties and biomass burning emissions in southeastern**
5
6 **Mexico during the period 2005–2009**
7
8
9

10 Carabali Giovanni^{1*}, Ríos Blanca Estela²,
11 Florean-Cruz Lizeth^{1,3}, Estévez Hector¹, Valdés-Barrón Mauro¹, Bonifáz Roberto¹ y
12 Riveros-Rosas David¹.
13
14
15
16
17
18
19

20 ¹Observatorio de Radiación Solar
21

22 Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico City,
23
24 Mexico
25
26
27
28

29 ²Centro de Ciencias de la Atmosfera, Universidad Nacional Autónoma de México,
30
31 Mexico City, Mexico.
32
33
34
35

36 ³ Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico City,
37
38 Mexico
39
40
41
42

43 *Corresponding author:
44

45 E-mail address: carabali@igeofisica.unam.mx
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

Abstract

In this study, the incidence and distribution of forest fires from 2005 to 2009 in southern Mexico were investigated. During the spring, the atmosphere of this region is dominated by the presence of aerosols generated by Biomass Burning (BB) emissions. We use observations of fire radiative power (FRP) from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) to estimate the emissions from BB. The results indicated a gradual increase in fires through the years and an annual change in the distribution of events. Campeche and Yucatan are the states in southeastern Mexico where BB produces the highest emissions of carbon dioxide (CO₂), carbon monoxide (CO), black carbon (BC) and particulate material PM_{2.5} and PM₁₀. However, the largest emissions come from wildfires in Guatemala.

A characterization of the optical properties of the aerosols emitted during BB is also presented. Trends of Aerosol Optical Depth (AOD), Angstrom exponent (α), Single Scattering Albedo (SSA), and column-integrated volume size distributions were analyzed using a 5-year (2005–2009) dataset from AErosol RObotic NETwork (AERONET) observations over Tuxtla Gutierrez (TG), Chiapas. The overall mean AOD at 500 nm during the 2005–2009 period was 0.26 ± 0.18 . However, high AOD values > 1.0 in spring of 2005 would indicate the high load of particles emitted by fires. The overall mean of α at 440 – 870 nm was 1.4 ± 0.21 , which confirms the presence of fine aerosols. Additionally, the classification of aerosols with the Gobbi et al. (2007) method and with the Spectral De-convolution

1
2
3 Algorithm (SDA) shows that fine-mode aerosols dominated AOD variability in TG.
4
5 In this paper, the trajectories of air masses (500 m) arriving at TG site were
6
7 classified by using backward trajectory cluster analysis. Trajectory clustering
8
9 results indicate a BB regional transport from Central America that affects aerosol
10
11 optical properties in southeastern Mexico.
12
13

14
15
16
17 In the final part of this article, the AOD spectra, column-integrated volume size
18
19 distributions, SSA and imaginary refractive index (K_i) measured in TG are
20
21 compared with those retrieved from AERONET in the tropical biomass burning
22
23 regions of Brazil and Zambia. TG presents the highest SSA values (0.95 – 0.93),
24
25 the largest size in fine mode ($r = 0.33 \mu\text{m}$) and the smallest K_i (0.006 – 0.005) in
26
27 all wavelengths, which may result from a combination of smoldering combustion of
28
29 the perennial rainforest.
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

1. Introduction

Biomass burning (BB) are the largest global source of fine carbonaceous particles and the second largest source of trace gases (Akagi et al. 2011; Liu et al. 2016). These fires occur mainly in the tropics, playing a critical role in global atmospheric chemistry (Penner et al. 1992). These particles are of great interest due to the possible severe impacts on people's health and due to other adverse effects, such as a severe reduction in visibility that may affect aviation operations.

During the spring season in southeastern Mexico there are strong forest fires due to the climatic conditions of the region (dry conditions), but especially due to anthropogenic activities (land use and agricultural activities) (Yokelson et al. 2009; Vicente et al. 2014). According to Yokelson et al., (2009) the tropical dry forests of Yucatan are an example of the ecosystem that represents the largest amount of biomass burned worldwide.

In addition to Yucatan, biomass burning in Central America (Belize and Guatemala) is also an important source of anthropogenic aerosols throughout the region (Kreidenweis et al. 2001). The pollution caused by these wildfires affects air quality locally and can also be transported to the southern United States, where they affect the air quality and visibility of some cities (In et al., 2007).

The distribution of fires and the emissions of gases produced by the burning of biomass can be studied with measurements made by on-board satellite detectors.

1
2
3 For example, the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) was
4 the first instrument designed with fire detection tools, which provide global daily
5 observations of fires (Roy et al., 2005). These data have been used for long-term
6 monitoring of fires and to characterize episodes of air pollution caused by BB at
7 various spatial and temporal scales (Csiszar et al. 2005; Rios and Raga, 2017).
8
9
10
11
12
13

14
15
16
17 On the other hand, the impact of BB aerosols in the atmosphere can be estimated
18 by measuring their optical and microphysical properties, in particular, by studying
19 the spectral dependence of the aerosol optical depth (AOD) parameter. AOD value
20 is dimensionless and represents the vertical extinction of solar radiation by the
21 aerosol in whole atmospheric column (Reid et al., 1999, Holben et al., 1998).
22 Furthermore, by measuring AOD in two wavelengths, it is possible to estimate the
23 Ångström exponent (α), which is a good indicator of the size range of particles
24 responsible for the extinction of radiation. When $\alpha > 1$, fine-mode aerosols are
25 dominant, whereas $\alpha < 1$ corresponds to coarse particles (Reid et al., 1999). Those
26 BB events with AOD > 1.5 are not common in most regions, but it is interesting to
27 study them, due to possible impacts on respiratory health and severe visibility
28 reduction. AOD, as well as other optical parameters of the aerosols are measured
29 using an automatic sun-tracking photometer, which measures direct and diffuse
30 solar radiation at various wavelengths.
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50

51 The aim of this work is to characterize BB in southeastern Mexico by studying its
52 distribution using satellite data acquired by MODIS. The BB emissions were
53 estimated using the MODIS Fire Radiative Energy (FRE) observations. Finally, the
54
55
56
57
58
59
60

1
2
3 optical properties of BB aerosols were studied with a dataset provided by the
4 Aerosol Robotic Network (AERONET). The main aerosol optical parameters (AOD
5 and Ångström exponent) were measured during the 2005 – 2009 period with a
6 CIMEL automatic tracking sun photometer placed at TG City.
7
8
9
10
11
12
13

14 **2. Materials and methods**

15 **2.1. Region of study**

16
17
18
19
20
21
22
23
24 In order to study BB aerosols, the measurement station was placed in the
25 Universidad Autónoma de Chiapas campus in Tuxtla Gutiérrez (TG) City (fig. 1),
26 which is the most developed, populated (598,710 inhabitants) and therefore the
27 state's most important municipality (INEGI, 2013). TG City is surrounded by
28 extensive vegetation, mainly in the southeast where are located large areas of
29 forest reserves: Montes Azules, Lacandona, Calakmul and the Maya Biosphere
30 Reserve (between Mexico, Guatemala and Belize). Together these ecosystems
31 form one of the most important tropical forests in Americas. In the last decades,
32 there has been a significant increase in anthropogenic activities in areas very close
33 to these ecosystems. Specifically, it has been observed a growth in population, as
34 well as economic activities such as agriculture and tourism that have generated
35 significant deforestation.
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53

54 [Figure 1 near here]
55
56
57
58
59
60

1
2
3 The tropical rainforest is the second most abundant ecosystem of Mexico (with
4 5000 species of plants). This ecosystem can be divided into two main forest types:
5
6 evergreen tropical forests and dry forests. Evergreen tropical forests are the most
7
8 diverse of Mexico and the most threatened. This kind of vegetation is found in the
9
10 plains of the Gulf of Mexico, southeast of the Yucatan Peninsula, and the easterly
11
12 side of Chiapas and surrounding areas (CONAFOR, 2012; Challenger and
13
14 Soberon, 2008; Becerra, 2005). The tropical dry forest is a vegetation group
15
16 dominated by medium-sized trees that have an important loss of their leaves
17
18 during the dry season. This forest located on the Pacific slopes of Mexico, covering
19
20 a large amount of territory from Sonora state, through Chihuahua to the southern
21
22 region of the country in the state of Chiapas and part of Central America
23
24 (Challenger and Soberon, 2008; Becerra, 2005; CONAFOR, 2012).
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34

35 **2.2. CIMEL sun photometer and measurements**

36
37
38
39

40 In this article a 5 years AERONET dataset (2005 – 2009) was used to study the
41
42 aerosol optical properties over TG City. The dataset measured by AERONET is
43
44 classified in 3 quality levels: level 1.0 for unscreened (raw data), level 1.5 for cloud-
45
46 screened and level 2.0 for quality assured data (Holben et al., 1998; Smirnov et al.,
47
48 2000). The measurements were made by a sun-photometer CIMEL (CE-318),
49
50 which is an automatic sun tracking photometer that performs measurements in
51
52 eight spectral channels: 340, 380, 440, 500, 675, 870, 940 and 1020 nm. Spectral
53
54 extinction of the direct beam radiation is measured with a detector within the 340–
55
56
57
58
59
60

1
2
3 1020-nm spectral range. These solar extinction values are used to estimate
4 aerosol optical thickness according to the Beer–Lambert–Bouguer Law. The
5 accuracy of the AOD values were estimate by Holben et al. (1998), who found
6 uncertainties around 0.01–0.02 for Level 2.0 data. A detailed analysis of aerosol
7 optical properties retrieved from AERONET can be found in Dubovik et al. (2000a).
8
9

10
11
12
13
14
15
16
17 The CIMEL sun photometer is configured to measure the angular distribution of sky
18 radiance at approximately every hour during the daytime. These sky
19 measurements are used to estimate the size distribution of atmospheric aerosols
20 (Dubovik and King, 2000). Our CE-318 instrument is automatically activated
21 according to the procedures previously programmed. The CIMEL instrument was
22 situated on the roof of the main building in Universidad Autónoma de Chiapas (16°
23 45' N, 93° 9' E and 590.0 Meters of elevation) located in TG City that is the capital
24 of the state of Chiapas located in the southeast Mexico. With this instrument, we
25 have conducted continuous observations from January 2005 to February 2010.
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39

40 **2.3. Ångström parameter**

41
42
43
44 Aerosol optical depth (AOD) is a dimensionless quantity that measure of the
45 extinction of the solar radiation by aerosol particles (dust, smoke, pollution)
46 suspended in a vertical column of atmosphere. The AOD spectral dependence can
47 be parameterized by using the Ångström exponent (α) (Reid et al., 1999):
48
49
50
51
52
53
54
55

$$56 \tau_a = \tau_0 \lambda^{-\alpha} \quad (1)$$

1
2
3
4
5 Where τ_a is the AOD, λ is the wavelength (in μm), and τ_0 is the optical depth at $\lambda =$
6
7
8 1 μm .
9

10
11
12 Solving eq 1 for α we obtain eq 2, in where Ångström exponent (α) can be
13
14 computed for any subrange (Eck et al., 1999):
15

$$\alpha(\lambda_1, \lambda_2) = -\ln\left(\frac{\tau_{\lambda_2}}{\tau_{\lambda_1}}\right) / \ln\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right) \quad (2)$$

16
17
18
19
20
21
22
23
24
25 Where τ_{λ_1} and τ_{λ_2} are AOD at wavelengths of λ_1 and λ_2 , respectively. The α
26
27 parameter is a good indicator of the size range of the atmospheric particles
28
29 responsible for extinction of the radiation.
30
31
32
33

34 **2.4. Cluster back-trajectory analyses**

35
36
37
38
39 Cluster analysis, a multivariate statistical method, was used as an exploratory tool
40
41 to divide the trajectory data into distinct transport groups or clusters. Five clusters
42
43 analyses were performed with the back trajectories calculated using the Hybrid
44
45 Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) model (Stein et al,
46
47 2015, Rolph, 2016) run at 40 m above ground level using the National Center for
48
49 environmental Prediction (NCEP) Reanalysis data.
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

1
2
3 The back trajectories calculated per day during March to May from 2005 to 2009
4 were clustering using Openair: open source tools for air quality data analysis. The
5 total number of clusters was determined based on the requirement that each
6 differed by at least 30% change in total spatial variance (Stein et al, 2015).
7
8
9
10
11
12
13

14 **2.5. Fire detection: dataset**

15
16 In this study, Aqua Climate Modeling Grid (CMG) product was used to estimate
17 Terra/Aqua ratio. The CMG provides monthly mean fire radiative power, as well as
18 products describing cloud fraction and corrected pixel counts at 0.5° spatial
19 resolution (Giglio et al. 2006). In addition, we used MODIS Fire and Thermal
20 Anomalies Product (MYD/MOD14). The fires observation MYD/MOD14 products
21 are based on the absolute detection of a fire (fires with a significant intensity), and
22 on the detection relative to its background (temperature surface variability and
23 solar light reflection). The thermal observations are provided by the MODIS
24 instrument onboard Aqua and Terra satellites at 1-kilometer resolution for fire
25 channels at 4 and 11 μm (Kaufman et al. 1998).
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41

42 **2.6. Method of estimation of biomass burning emissions**

43
44 We estimated the BB emissions through to satellite-based bottom-up approach by
45 multiplying the biomass consumed (Kg) by emission factor (g Kg^{-1}) for different
46 pollutants (Table 1). The biomass burned was proportional to FRE and is
47 calculated using equation (3).
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

$$M = \text{FRE} \times \text{CR} \quad (3)$$

where M is the quantity of biomass burnt inside one fire pixel; FRE (Fire Radiative Energy) is the temporal integration of FRP (Fire Radiative Power) from MODIS; and CR is the combustion conversion ratio (kg MJ^{-1}). To estimations in this work we choose CR values of 0.41 kg/MJ , which is the average of the values found in two different studies (Wooster et al. 2005; Freeborn et al. 2008). Since MODIS FRP data only is provided four times per day at the place of study, Vermote et al. (2009) detected that the FRP diurnal cycle follows a Gaussian distribution, and FRE was calculated using an adapted Gaussian function:

$$\text{FRP}(t) = \int_0^{24} \text{FRP}_{\text{peak}} \left(b + e^{-\frac{(t-h)^2}{2\sigma^2}} \right) dt \quad (4)$$

where FRP_{peak} is the maximum value of the fire diurnal cycle, b is the background level of the diurnal cycle, σ is the width of fire diurnal curve, and h is the peak hour. Vermote et al. (2009) inferred that parameters b, σ and h are associated with the Terra/ Aqua (T/A) FRP ratio. These parameters are given by the next equations:

$$b = 0.86x^2 - 0.52x + 0.08 \quad (5)$$

$$\sigma = 3.89x + 1.03 \quad (6)$$

$$h = -1.23x + 14.57 \quad (7)$$

where x denoted the annual average T/A FRP ratio. We then calculate FRP_{peak} using the equation:

$$FRP_{peak} = \frac{FRP \text{ Aqua day}}{\left(\frac{(13.5-h)^2}{b+e} \right) + \left(\frac{(01.5-h)^2}{2\sigma^2} \right)} \quad (8)$$

[Table 1 near here]

3. Results

3.1. *Optical properties of aerosols in southeast México: biomass burning emission*

The measurements of AOD and $\alpha_{(440-870)}$ are fundamental to characterize aerosol optical properties of BB emissions. Both parameters may be employed to infer the concentration of suspended particles, its size distribution and physical changes in the atmosphere. The sun photometer at the AERONET site in TG City provides a 5-year dataset (2005 – 2009) for investigating AOD₅₀₀ and $\alpha_{(440-870)}$ trends during biomass burning (BB) season in the southeastern region of Mexico. Those strong BB events that occur during the spring season (from March to May) across southern states of Mexico emit numerous smoke plumes with high optical depth.

Aerosol optical properties in figure 2 show the temporal evolution of monthly means of AOD in 500 nm, $\alpha_{440-870}$, precipitable water (PW) for the AERONET

1
2
3 stations in Tuxtla Gutierrez for 2005–2008 period. Fig. 2a shows maximum values
4 of AOD (>0.5) that are measured during the spring months (April and May in
5 shaded areas), where the highest values of Solar radiation are reached. These
6 high AOD values are due to the high load of aerosols generated by BB. However,
7 that difference from year to year in the maximum AOD value during BB seasons
8 would indicate variations in the intensity and number of fires. During the analysis
9 period, AOD reached peak values of 0.82 and 0.91 for April and May of the years
10 2005 and 2006, respectively. The lowest AOD values (~ 0.2) measured during the
11 other seasons of the year; rainy and dry-winter (July–November and December–
12 February, respectively) can be associated with anthropogenic emissions in the
13 urban area of TG.

14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31 Fig. 2b shows the trend of Ångström exponent (α) and PW during the period 2005–
32 2008. The α parameter that is directly related to the aerosol size distribution shows
33 an annual cycle in where peak values are reached in the spring season (April and
34 May). The highest α values (>1.6) are measured during the BB months, while the
35 lowest values (<1.2) are measured during the rainy months when PW reaches its
36 maximum. Values of α between 1 and 1.5 indicate a bimodal aerosol-size
37 distribution, in where fine particles predominate (Eck et al., 1999).

38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49 Atmospheric PW is the column-integrated amount of water vapor. Fig. 2b PW
50 shows a seasonal trend with minimum values measured during the months of
51 January and February, followed by a rapid increase during the spring months, and
52 maximum values during the rainy season.

[Figure 2 near here]

Figure 3 show monthly averages of α (440 – 870 nm), PW and AOD at 500 nm over Tuxtla Gutierrez, from January 2005 to December 2009. The averages values were calculated with a minimum of 58 observations (N) per month. Monthly values averaged over the entire period (5 years) and the related statistical information is shown in table 2. There is small variability in α (440 – 870 nm) values (fig. 3a). However, the highest value (~ 1.6) occurs during the spring months (April and May), and the minimum value (~ 1.0) occurs in the month of July during the rainy season.

The water vapor tendency (PW) presents a significant variability that is according to the seasonal behavior in Mexico (fig 3b). PW shows low average values (~ 2.3) during January and February of the winter season. PW begins to increase in March until reaching the highest values in June (~ 3.7) where the rainy season (from June to October) starts. The maximum value of PW was measured in the month of September (~ 4.0).

Overall mean AOD (500 nm) in the analyzed period was 0.26 ± 0.18 . The seasonal behavior in monthly averages (fig. 3c) shows a constant increase of AOD from background levels in March (0.18) to values above ~ 0.6 for April and May; followed by an abrupt decrease in July where background values are reached again. The low AOD values observed that predominate in other months of the year (Jul – Dec and Jan – Mar), could be associated to the local emissions from the TG

1
2
3 urban area, which originate from vehicle exhaust and other anthropogenic
4 activities. The Angstrom exponent confirms the presence of fine particles, because
5 its average value in the entire period (2005–2009) was 1.4 ± 0.21 , with a maximum
6 monthly value of 1.6 reached in the months of May and April.
7
8
9
10

11
12
13
14 In general, burning in the southeast region of Mexico and Central America during
15 spring emitted a significant aerosol burden over this region, which induces the
16 several serious haze events that Tuxtla Gutierrez City experienced during spring. It
17 is estimated that Yucatan alone contributed with almost 40% of the total biomass
18 burned in Mexico in 2006, which could generate ~44 Tg of biomass burned
19 (Yokelson et al, 2009).
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29

30
31 [Table 2 near here]
32
33

34
35 [Figure 3 near here]
36
37
38
39

40 In order to see the annual behavior of the main optical parameters, aerosol size
41 distribution, AOD, α and PW were plotted for 2005. That year was chosen because
42 it presents the most complete database and due to the occurrence of strong fires.
43 Fig. 4 shows the trend of aerosol optical parameters during 2005 measured by the
44 CIMEL sun photometer in TG City. Figure 4a shows the behavior of α and PW
45 parameters. PW shows an increase from average values of 2.4 cm in the first two
46 months (February to March) to values of ~4.0 cm in the rainiest months of the year
47 (September to October). The Ångstrom parameter is high (~1.5) during most of the
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

1
2
3 year, but reaches its maxima (>1.7) during the BB season. However, a decrease in
4
5 α (~ 1.0) is observed in September, which is probably due to the rains in that
6
7 season.
8
9

10
11
12 Data plotted in figure 4b show the trend of AOD during 2005, with values > 1.5
13
14 measured in BB days. In some days, AOD reaches peak values of ~ 2.0 , which
15
16 indicates that the aerosol is dominated by absorbing fine mode particles. Figure 4c
17
18 shows the aerosol size distribution during the year 2005. The distribution is
19
20 bimodal during the BB days and almost unimodal during pre- and post-burning
21
22 days. That size distribution on BB periods shows a dominance of accumulation
23
24 mode particles with mean radius of $\sim 0.14 \mu\text{m}$. However a small fraction of coarse
25
26 particles was measured, which could be associated with agricultural practices.
27
28
29
30
31

32
33 [Figure 4 near here]
34
35
36
37

38 **3.2. Aerosol Classification**

39
40
41

42 A classification study of aerosols over TG City was done by using direct sun-
43
44 photometer observations at the AERONET site in Tuxtla Gutierrez. The 5-year
45
46 dataset of aerosol optical properties was analyzed by applying the classification
47
48 method described by Gobbi et al. (2007). In this method, the curvature of the
49
50 Angstrom exponent ($d\alpha/d\lambda$) is explored by estimating the difference between α
51
52 values ($\delta\alpha$) measured in different wavelength ranges ($\delta\alpha = \alpha_{(440, 675)} - \alpha_{(675, 870)}$). It
53
54 was demonstrated that negative values of the $\delta\alpha$ indicate the dominance of fine-
55
56
57
58
59
60

1
2
3 mode aerosols, while positive differences indicate the effect of two separate
4 particle modes (Kaufman 1993). In figure 5 the $\delta\alpha$ vs. the $\alpha_{(440, 870)}$ space is plotted
5 as the framework for analyzing aerosol properties. In this scheme the values of the
6 AOD at 500 nm (τ_{500}) are represented using a color scale, the solid black lines
7 represent the fine-mode effective radius (R_f) and dashed blue lines indicate the
8 contribution (η) (in percent) of the fine fraction to the total AOD at 500 nm (Carabalí
9 et al. 2017).

10
11
12 To study optical properties of BB aerosols, we plotted data by choosing two
13 periods: BB months (spring) and non-BB months (rainy and dry-winter); these data
14 are presented in Figs. 5 (a) and 5 (b), respectively. These figures show differences
15 regarding aerosol types and their modification processes. Figure 5 (a)
16 demonstrated the classification of aerosols measured during the BB months. Data
17 cluster around negative values of $\delta\alpha$ ($0 > \delta\alpha > -0.5$) and larger α ($2.2 > \alpha > 1$)
18 indicate the dominance of fine-mode aerosols. Most particles with AOD < 0.4 (fig. 5
19 a) move along the black line of R_f $0.10 \mu\text{m}$ with a contribution $\eta > \sim 70\%$, while the
20 data with high AOD (> 1.5) values are aligned around R_f $0.15 \mu\text{m}$. Data with AOD $>$
21 2.0 (black and red dots) along $R_f = 0.15 \mu\text{m}$, are of special interest because they
22 can be associated with the presence of highly absorptive particles. This significant
23 increase in AOD and R_f , could be associated with the aging process of aerosol,
24 which that affects directly the size distribution because of coagulation,
25 condensation process.

1
2
3 Although most of the particulates during the BB season come from forest fires, a
4 small proportion is generated by anthropogenic activities in Tuxtla Gutierrez City.
5
6 Figure 5 b shows the classification of aerosols during the non-BB months. In this
7
8 Figure, most of the data (blue dots) with $0.3 > \text{AOD} > 0.15$ move along the black line
9
10 of $R_f = 0.10 \mu\text{m}$ with a contribution η of $\sim 70\%$. Those data with low AOD ($0.15 -$
11
12 0.30) have a slight tendency to branch toward smaller $R_f (< 0.10 \mu\text{m})$ sizes, which
13
14 evidence fine particles of anthropogenic origin. Data in figure 5 b also evidence
15
16 coarse aerosol, since a significant fraction ($< 50\%$) of data are grouped around $d\alpha$
17
18 positive values ($0.4 > d\alpha > 0$), which indicates significant contribution of coarse-
19
20 mode particles associated with bi-modal size distribution.
21
22
23
24
25
26
27

28 [Figure 5 near here]
29
30
31
32

33 Figure 6 presents the time series of fine (FM) and coarse (CM) mode monthly
34 average AOD at 500 nm from Spectral De-convolution Algorithm (SDA) outputs.
35 These measurements retrieved from AERONET dataset, corresponding to the
36
37 2005 – 2009 period at TG City. SDA process the spectral total extinction AOD,
38
39 assuming that aerosol-size distribution are bimodal (O'Neill et al., 2001; 2003). FM
40
41 AOD shows the highest values during the entire period (2005–2009), with
42
43 maximums reached in the burning season. While the CM AOD values were the
44
45 lowest with values that are in the $0.02 - 0.20$ range. These values suggest that
46
47 nearly all of the variability in total AOD is due to fine-mode particles. Those
48
49 maximum values of FM AOD that occur during spring months are generated by the
50
51 presence of fine particles (strongly absorbent) generated during the burning of
52
53
54
55
56
57
58
59
60

1
2
3 biomass. However, other fraction of aerosols may be emitted by the anthropogenic
4 activities of the urban region of Tuxtla City. These fine aerosols are originated most
5 commonly from industrial, local transportation, and domestic emissions, while
6 coarse particles are mostly dust from resuspensions of soil by local winds.
7
8
9
10
11
12
13

14 [Figure 6 near here]
15
16
17
18

19 **3.3. Clusters of back trajectories**

20
21
22

23 There was large temporal variability in the aerosol optical properties in Tuxtla
24 Gutierrez; these concentrations are controlled by rate of production, photochemical
25 properties, and their origin. Back trajectories sets computed by Openair were
26 analyzed in order to assess the origin of prevailing air masses (fig. 7).
27
28
29
30
31
32
33
34

35 [Figure 7 near here]
36
37
38
39

40 The air masses during the BB season in all years of study originate mainly from the
41 Atlantic, near Cuba, and travel long distances until reaching Belize, northern
42 Guatemala, and TG. The other main cluster came from the Gulf of Mexico, near
43 Florida, passing through the Yucatan peninsula ending over TG. During 2007, the
44 clusters are different; the C1 originated from near Jamaica before passing along
45 the coastline of Honduras and crossing Guatemala to reach the point of study. The
46 air parcels in C2 came from Cuba and reached TG by passing first through Belize
47 and then Guatemala. The analysis of AOD over TG showed the significant
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

1
2
3 contribution of coarse mode aerosols during the BB period. The high AOD over
4 Tuxtla Guetierrez could be attributed to BB aerosols brought to these regions by
5
6 different air masses from Belize, Guatemala, Campeche, Yucatan, Quintana Roo,
7
8 and Tabasco.
9
10

11 12 13 14 **3.4. Fires spatial distribution and biomass burning emissions** 15

16
17
18 To determinate which region has a greater contribution to AOD over TG, we
19
20 estimated the emissions of biomass burning of the source regions during the BB
21
22 period from 2005 to 2009. Figure 8 presents the spatial distribution of 5 years
23
24 (March to May 2005 – 2009) of fires in southeastern Mexico and northern Central
25
26 America. The figure shows two important aspects: a gradual decrease in fire
27
28 intensity through the years and an annual change in the distribution of events. Most
29
30 of the fires are concentrated in zones around of the Calakmul Biosphere Reserve
31
32 in Campeche and in the Mayan Biosphere Reserve in Guatemala and Belize. In
33
34 2006 and 2009, some actives fires were observed around the Yum Balam Flora
35
36 and Fauna Protection Area in Quintana Roo. In Yucatan, active fires were detected
37
38 throughout its entire territory, while in Chiapas, the fires were centered in the
39
40 rural areas. A significant population resides in the Yucatan, starting from the City of
41
42 Cancun in Quintana Roo state, passing through Merida in Yucatan, and ending in
43
44 the city of Villa Hermosa in Tabasco state. These are the most important cities of
45
46 the southeast, each one with a population of less than 1 million inhabitants.
47
48 Nevertheless, there remain a significant number of inhabitants living in rural areas
49
50 adjacent to important ecological reserves. The wildfire activity patterns in the
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

southeastern Mexico forest have been shaped by the continuous influence of humans, including anthropogenic activities that create potentially burnable areas. In many Mexican rural communities, agriculture is the largest single cause of severe forest degradation, and that deforestation leads to fires.

[Figure 8 near here]

Table 3 presents the average BB emissions (Gg) derived from MODIS FRP during all from 2005 to 2009 in southern Mexico, Belize and Guatemala. The table shows that Yucatan and Campeche are the states in southeastern Mexico where the burning of biomass produces the highest emissions of contaminating gases, such as carbon dioxide (CO₂), carbon monoxide (CO), and black carbon (BC), and particulate material PM_{2.5} and PM₁₀. However, the largest emissions come from the burning of biomass produced in Guatemala (table 3). The amounts of CO, CO₂, BC, PM_{2.5} and PM₁₀ emitted by the fires in Guatemala are, respectively, 2.7, 3.3, 3.8, 3.2, and 3.0 times greater than those in Campeche, even though Campeche is the state that generates the most emissions in southeastern Mexico. The BB emissions advected from the air masses from northern Guatemala and the coastline of Campeche affect in approximately 50% of the AOD measured in Tuxtla Gutierrez according to the cluster analysis computed during the study period.

[Table 3 near here]

3.5. Comparison of the aerosol optical properties for different source regions

1
2
3
4
5 In order to place in context the measurements made in this study, this section
6 presents a comparison of optical properties of BB aerosol from TG with respect to
7 those emitted in Brazil and Zambia during BB periods. The description here was
8 done in a similar way to that reported by Eck et al (2003), from which some ideas
9 were taken.
10
11
12
13
14
15
16

17 Figure 9 shows results of AOD, aerosol size distribution, single scattering albedo
18 (SSA) and refractive index at wavelengths from 340 to 1020 nm from data retrieved
19 of AERONET stations in Juru (Brasil), Mongu (Zambia) and Tuxtla Gutierrez
20 (Mexico). For all cases, there are significant spectral differences of AOD
21 throughout the wavelength range (fig. 9a). Biomass burning in Juru presents the
22 highest values of AOD, with higher differences in low wavelengths. For example, at
23 340 nm the AOD difference between the Juru with Tuxtla (Mexico) and Mongu
24 (Zambia) cases are 1.2 and 1.8 respectively. Tuxtla's AOD values are higher than
25 those measured in Mongu, which shows the lowest values (fig. 9a). This
26 wavelength dependency of AOD results in large differences in the Angstrom
27 exponent ($\alpha_{440 - 870}$), which ranging from 2.0 for the Brazil case to 1.7 for the
28 Zambia case.
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46

47 The retrieved aerosol size distributions for these cases (Juru, Tuxtla and Mongu) in
48 figure 9b, present important differences in fine-mode particle size, with the Tuxtla
49 BB aerosols having the largest radius particles (peak volume with modal radius, $r =$
50 $0.33 \mu\text{m}$), while the Zambian aerosol the smallest one ($r = 0.11 \mu\text{m}$). These large
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

1
2
3 differences in fine-mode size between all cases are mainly due to the differences in
4 the burned vegetation and the meteorological conditions of each site. In biomass
5 burning in the tropical regions of Brazil and Zambia, fresh smoke plumes are often
6 mixed with those aged smoke plumes, due to the large number of intense fires
7 (Eck et al 2003). On the other hand, the large particle size observed for Tuxtla
8 case may result from a combination of smoldering combustion from perennial
9 rainforest. The high humidity conditions in southeast Mexico during spring and urban
10 emissions over Tuxtla Gutierrez City may lead to subsequent production of
11 hygroscopic aerosol species (Decesari et al., 2002; Kreidenweis et al., 2001)

12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26 Single scattering albedo (SSA) values show significant differences (fig. 9c). The
27 highest SSA values were measured for aerosols over Tuxtla, which presents the
28 largest particles with the small imaginary refractive index. The Juru smoke had
29 SSA values in the range of 0.94 – 0.91, which suggests the presence of aerosol with
30 relatively low absorption. The lowest SSA values (more absorbent particles) was
31 measured in Zambia, where the smoke plume is generated in the flaming stage of
32 the combustion process of savanna grass, which produces higher amounts of
33 black carbon than wildfires in the other deforestation cases (Tuxtla and Amazonia)
34 (Eck et al., 2003; Ward et al., 1992, 1996).

35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49 Figure 9d presents the the imaginary refractive index (k_i) for all three cases. This
50 value that is related to the absorption coefficient of the aerosol particles is good
51 evidence the presence of black carbon, since a small spectral dependency of K_i
52 was observed. between 400 and 1100 nm region (Bergstrom et al., 2002;

1
2
3 Bergstrom, 1972). Smoke measured by sun photometer in TG presented the lower
4 values (0.0065 – 0.0063 range), which suggests that these fires were from the
5 smoldering phase. These results also evidence the presence of aged BB plumes
6 that tend to be less absorbent than fresh BB aerosols. It is important to mention
7 that solar radiation in southeastern Mexico is very intense during the spring, which
8 also favors the photochemical aging process of the aerosols.
9

10
11
12
13
14
15
16
17
18
19 Imaginary refractive index for Zambia is the higher than Mexico (from 0.027 to
20 0.028), with a slight spectral variability that would indicate the presence of a
21 mixture of aerosols. As mention before, smoke generated in Zambia, are mostly
22 produced in the flaming stage of savanna grass fires, which emitted a higher
23 amount of black carbon with smaller size the particle (Eck et al., 2003; Ward et al.,
24 1992, 1996).
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34

35 [Figure 9 near here]
36
37
38
39

40 **4. Conclusions**

41
42
43
44 In this paper, a study of the optical properties of aerosol over Tuxtla Gutierrez
45 (TG), Chiapas were done by analyzing a 5-years (2005 – 2009) dataset of
46 measurements from AERONET Sun-photometer.
47
48
49
50

51
52
53 The time series and spectral behavior of aerosol optical depth (AOD), Angstrom
54 exponent (α) and single scattering Albedo (SSA) were analyzed. To the best of our
55
56
57
58

1
2
3 knowledge, this paper is the first to analyze, in a quantifiable manner, the long-time
4 series of the optical properties of biomass burning (BB) aerosol in southeastern
5 Mexico. Although the overall mean AOD_{500} (0.26 ± 0.18) is not significantly high,
6 that value could be the result of local emissions from TG urban area. However, the
7 monthly AOD averages for 2005 – 2009 period reach high values (>0.6) in the
8 months of April and May which correspond to the spring season where the
9 biomass burning occurs.
10
11

12
13
14
15
16
17
18
19
20
21 In the other months of the year (others than spring) the AOD values remain almost
22 constant with an average value of ~ 0.2 , which could be associated with local
23 anthropogenic activities.
24
25
26
27
28
29

30
31 The overall mean of Angstrom exponent (α) at 440 – 870 nm was 1.4 ± 0.21 ,
32 although maximum values of 1.6 were reached during BB months (May and April).
33 Column-integrated volume size distributions of aerosols over TG have a bimodal
34 structure similar to those observed in other tropical biomass burning events
35 (Zambia and Brazil). The fine mode generally has a radius around ~ 0.33 , while the
36 coarse mode of $\sim 3.9 \mu\text{m}$. In addition to the above, the results from aerosol
37 classification based in $d\alpha/d\lambda$ analysis and the Spectral De-convolution Algorithm
38 (SDA), demonstrate the presence of fine aerosols, which dominate the AOD
39 variability.
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51

52
53
54 Over the 5-year period studied, we observed how wildfire activity patterns have
55 been shaped by the increasing influence of humans, including potentially creating a
56
57

1
2
3 novel fire regime. A gradual decrease in fires frequency and annual distribution of
4 fire events was observed. Although most of fires occur around the protected areas
5 in Guatemala and Campeche, there is an influence from the burning that occurs in
6 other regions of Mexico (Yucatan and Quintana Roo), but mainly from Central
7 American countries such as Guatemala and Belize. An increase in the size of fine
8 mode particles and high values for AOD and single scattering albedo (SSA) was
9 observed, which suggests the presence of aged aerosols probably transported
10 from other regions. This smoke transport from Central America fires affecting TG
11 during the spring seasons of the 2005 – 2009 period was evidenced with the
12 analysis of back-trajectories cluster analysis. Wildfires in Campeche and Yucatan
13 states produce the highest emissions of CO₂, CO, BC, PM_{2.5} and PM₁₀; however,
14 the largest emissions come from BB in Guatemala.

15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33 In this study a comparison between the smoke emissions from tropical BB regions
34 (Zambia and Brazil) and southeastern Mexico was made. Larger particle size and
35 higher SSA were measured for smoke in TG, which can be associated to the aged
36 process of aerosol due to the long transport. It is important to consider that Central
37 America also has a high wildfire activity and its emissions can be transported to the
38 southern region of Mexico. The differences in fine mode particle radius between
39 TG (0.33 μm), Mongu (0.15 μm) and Juru (0.19 μm) are the result of the different
40 fuels burned, combustion phase, and aging (Eck et al 2003).

41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54 On the other hand, the high SSA (greater scattering) and the lower values of
55 imaginary refractive index (0.0065 – 0.0063) measured in TG suggests that these

1
2
3 fires were from the smoldering phase. That is, the emissions came from a slow,
4
5 low-temperature, flameless form of combustion. The smoldering wildfires consume
6
7 large amounts of biomass and produce an important damage to the entire
8
9 ecosystem.
10

11
12
13
14 Finally, this study provides direct evidence to motivate regulations to limit
15
16 agricultural burning, particularly in those regions of southeastern Mexico that are
17
18 close to forest reserves or protected areas. Moreover, satellite fire and aerosol
19
20 ground-based observations, such as those used in this study, are shown to provide
21
22 two important tools to monitor wildfires.
23
24
25
26
27

28 **Acknowledgement**

29
30
31
32 This work was supported by the UNAM-DGAPA-PAPIIT grant IA102116 (Mexico)
33
34 and partial support provided by Instituto de Geofísica (UNAM) internal projects.
35
36 The authors thank B. Holben and the AERONET staff for sun-photometer
37
38 calibration and support. In addition, we wish to thank Dr. Bradford Barret for
39
40 reviewing this manuscript and providing editorial and grammatical guidance for the
41
42 text.
43
44
45
46
47
48

49 **References**

50
51
52
53 Akagi, S. K., Yokelson, R. J., Wiedinmyer, C., Alvarado, M. J., Reid, J. S., Karl, T.,
54
55 Crouse, J. D., and Wennberg, P. O. 2011. "Emission factors for open and
56
57
58
59
60

1
2
3 domestic biomass burning for use in atmospheric models.” *Atmospheric Chemistry*
4 *and Physics* 11: 4039-4072. doi.org/10.5194/acp-11-4039-2011, 2011.
5
6
7

8
9
10 Becerra, J. X., 2005. “Timing the origin and expansion of the Mexican tropical dry
11 forest.” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of*
12 *America* 102 (31): 10919-10923.
13
14
15

16
17
18 Bergstrom Jr, R. W. 1972. “Predictions of the spectral absorption and extinction
19 coefficients of an urban air pollution aerosol model.” *Atmospheric Environment* 6:
20 247-258.
21
22
23
24
25

26
27
28 Bergstrom, R. W., Russell, P. B., Hignett, P., 2002. “Wavelength dependence of
29 the absorption of black carbon particles: Predictions and results from the TARFOX
30 experiment and implications for the aerosol single scattering albedo.” *Journal of the*
31 *Atmospheric Sciences* 59 (3): 567-577.
32
33
34
35
36

37
38
39 Carabali, G., Estévez, H. R., Valdés-Barrón, M., Bonifaz-Alfonzo, R., Riveros-
40 Rosas, D., Velasco-Herrera, V. M., Vázquez-Gálvez, F. A. 2017. “Aerosol
41 climatology over the Mexico City basin: Characterization of optical properties.”
42 *Atmospheric Research* 194: 190-201.
43
44
45
46
47
48

49
50
51 Challenger, A., Soberón, J., 2008. “Capital natural de México: Conocimiento actual
52 de la biodiversidad.” Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la
53 Biodiversidad (CONABIO), México. 1: 87–108.
54
55
56
57

1
2
3
4
5 CONAFOR 2012. "El Inventario Nacional Forestal y de Suelos Informe 2004–
6 2009." Comisión Nacional Forestal. <https://www.gob.mx/conafor>. Accessed date:
7
8 13 July 2018.
9
10

11
12
13
14 Csiszar, I., Denis, L. Giglio, L., Justice, C.O., Hewson, J. 2005. "Global fire
15 distribution from MODIS." *International Journal of Wildland Fire* 14: 117 – 130.
16
17

18
19
20
21 Decesari, S., Facchini, M. C., Matta, E., Mircea, M., Fuzzi, S., Chughtai, A. R.,
22 Smith, D. M., 2002. "Water soluble organic compounds formed by oxidation of
23 soot." *Atmospheric Environment* 36(11): 1827-1832.
24
25
26

27
28
29
30 Dubovik, O., King, M.D., 2000. "A flexible inversion algorithm for the retrieval of
31 aerosol optical properties from sun and sky radiance measurements." *Journal of*
32
33 *Geophysical Research* 105: 20673–20696.
34
35
36

37
38
39
40 Dubovik, O., Smirnov, A., Holben, B.N., King, M.D., Kaufman, Y.J., Eck, T.F.,
41 Slutsker, I., 2000a. "Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved
42 from Aerosol Robotic Network (AERONET) sun and sky radiance measurements."
43
44 *Journal of Geophysical Research* 105: 9791–9806.
45
46
47

48
49
50
51 Eck, T. F., Holben, B. N., Reid, J.S., Dubovik, O., Smirnov, A., O'Neill, N. T.,
52 Slutsker, I., Kinne, S., 1999. "Wavelength dependence of the optical depth of
53
54
55
56
57

1
2
3 biomass burning, urban, and desert dust aerosols.” *Journal of Geophysical*
4
5 *Research* 104 (D24): 31333-31349.
6
7

8
9
10 Eck, T.F., Holben, B.N., Reid, J.S., O'Neill, N.T., Schafer, J.S., Dubovik, O.,
11
12 Smirnov, A., Yamasoe, M.A., Artaxo, P., 2003. “High aerosol optical depth biomass
13
14 burning events: a comparison of optical properties for different source regions.”
15
16 *Geophysical Research Letters* 30 (20): 2035.
17
18
19 <http://dx.doi.org/10.1029/2003GL017861>.
20
21
22

23
24 Freeborn, P. H., Wooster, M. J., Hao, W. M., Ryan, C. A., Nordgren, B. L., Baker,
25
26 S. P., Ichoku, C. 2008. “Relationships between energy release, fuel mass loss, and
27
28 trace gas and aerosol emissions during laboratory biomass fires.” *Journal of*
29
30 *Geophysical Research*
31
32 113: D01301. doi:10.1029/2007JD008679.
33
34
35

36
37 Giglio, L., Csiszar, I., Justice, C. O. 2006. “Global distribution and seasonality of
38
39 active fires as observed with the Terra and Aqua Moderate Resolution Imaging
40
41 Spectroradiometer (MODIS) sensors. *Journal of Geophysical*
42
43 *Research* 111:G02016.
44
45
46

47
48
49 Gobbi, G. P., Kaufman, Y. J., Koren, I., Eck, T. F. 2007. “Classification of aerosol
50
51 properties derived from AERONET direct sun data.” *Atmospheric Chemistry and*
52
53 *Physics* 7 (2): 453-458.
54
55
56

1
2
3 Holben, B.N., Eck, T.F., Slutsker, I., Tanré, D., Buis, J. P., Setzer, A., Vermote, E.,
4 Reagan, J.A., Kaufman, Y.J., Nakajima, T., Lavenue, F., Jankowiak, I., Smirnov, A.
5
6 1998. AERONET, A federated instrument network and data archive for aerosol
7
8 characterization." *Remote Sensing of Environment* 66 (1): 1–16.
9

10
11
12
13
14 In, H. J., Byun, D. W., Park, R. J., Moon, N. K., Kim, S., Zhong, S. 2007. "Impact of
15
16 transboundary transport of carbonaceous aerosols on the regional air quality in the
17
18 United States: A case study of the South American wildland fire of May 1998."
19
20 *Journal of Geophysical Research* 112: (D7).
21
22

23
24
25
26 INEGI, 2013. "Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación, Serie
27
28 III (continuo nacional), escala 1: 250,000". Available: <http://inegi.gob.mx>: Instituto
29
30 Nacional de Estadística, Geografía e Informática–INEGI.
31
32

33
34
35 Kaufman, Y. J., 1993. "Aerosol optical thickness and atmospheric path radiance."
36
37 *Journal of Geophysical Research* 98 (D2): 2677-2692.
38
39

40
41
42 Kaufman, Y. J., Justice, C. O., Flynn, L., Kendall, J. D., Prins, E. M., Giglio, L.,
43
44 Ward, D. E., Menzel, W. P., & Setzer, A. W. 1998. "Potential global fire monitoring
45
46 from EOS-MODIS." *Journal of Geophysical Research* 103: 32215 – 32238.
47
48

49
50
51 Kreidenweis, S. M., Remer, L. A., Bruintjes, R., Dubovik, O. 2001. "Smoke aerosol
52
53 from biomass burning in Mexico: Hygroscopic smoke optical model." *Journal of*
54
55 *Geophysical Research* 106 (D5): 4831-4844.
56
57

1
2
3
4
5 Liu, C., Chung, C. E., Zhang, F. & Yin, Y. 2016. "The colors of biomass burning
6 aerosols in the atmosphere". *Scientific Reports* 6: 28267.
7
8

9
10
11
12 McCarty, J.L. 2011. "Remote sensing-based estimates of annual and seasonal
13 emissions from crop residue burning in the contiguous United States." *Journal of*
14 *the Air & Waste Management Association* 61: 22-34.
15
16
17

18
19
20
21 O'Neill, N. T., Eck, T. F., Smirnov, A., Holben, B. N., and Thulasiraman, S. 2003.
22 "Spectral discrimination of coarse and fine mode optical depth." *Journal of*
23 *Geophysical Research* 108: 4559. doi:10.1029/2002JD002975.
24
25
26
27

28
29
30
31 O'Neill, N.T., Eck, T.F., Holben, B.N., Smirnov, A., Dubovik, O., Royer, A. 2001.
32 "Bimodal size distribution influences on the variation of Ångström derivatives in
33 spectral and optical depth space." *Journal of Geophysical Research* 106, 9787–
34 9806. <http://dx.doi.org/10.1029/2000JD900245>.
35
36
37
38

39
40
41
42 Penner, J. E., Dickinson, R. E., and O'Neil, C. A. 1992. "Effects of aerosol from
43 biomass burning on the global radiation budget." *Science* 256: 1432–1433.
44
45
46
47

48
49 Reid, J. S., Eck, T. F., Christopher, S. A., Hobbs, P. V., Holben, B. 1999. "Use of
50 the Ångström exponent to estimate the variability of optical and physical properties
51 of aging smoke particles in Brazil." *Journal of Geophysical Research* 104 (D22):
52 27473-27489.
53
54
55
56
57

1
2
3
4
5 Ríos, B., Raga, G. B. 2018. "Spatio-temporal distribution of burned areas by
6 ecoregions in Mexico and Central America." *International Journal of Remote*
7
8 *Sensing* 39(4): 949-970.
9

10
11
12
13
14 Roy, D. P., Jin, Y., Lewis, P. E., Justice, C. O. 2005. "Prototyping a global
15 algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series
16 data." *Remote Sensing of Environment* 97 (2): 137-162.
17
18
19

20
21
22
23 Smirnov, A., Holben, B.N., Eck, T.F., Dubovik, O., Slutsker, I. 2000. "Cloud
24 screening and quality control algorithms for the AERONET data base." *Remote*
25
26 *Sensing of Environment* 73: 337–349.
27
28
29

30
31
32
33 Stein, A. F., Draxler, R. R., Rolph, G. D., Stunder, B. J. B., Cohen, M. D., and
34
35 Ngan, F. 2015. "NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling
36 system." *Bulletin of the American Meteorological Society* 96: 2059–2077.
37
38
39

40
41
42 Vermote, E., Ellicott, E., Dubovik, O., Lapyonok, T., Chin, M., Giglio, L., Roberts,
43
44 G. J. 2009. "An approach to estimate global biomass burning emissions of organic
45 and black carbon from MODIS fire radiative power." *Journal of Geophysical*
46
47 *Research* 114: D18205. doi:10.1029/2008JD011188.
48
49
50

1
2
3 Vicente, F. B., N. Carbajal, and L. F. P. Martínez. 2014. Estimation of total yearly
4 CO₂ emissions by wildfires in Mexico during the period 1999–2010.” *Advances*
5 *in Meteorology* ID958457: 1-8. doi:10.1155/2014/958457.
6
7
8
9

10
11
12 Ward, D. E., Hao, W. M., Susott, R. A. Babbitt, R. E. Shea, R. W., Kaufman, J. B.,
13 and Justice, C. O. 1996. “Effect of fuel composition on combustion efficiency and
14 emission factors for African savanna ecosystems.” *Journal of Geophysical*
15 *Research* 101: 23,569–23,576.
16
17
18
19
20

21
22
23
24 Ward, D. E., Susott, R. A., Kaufman, J. B., Babbitt, R. E., Cummings, D. L., Dias,
25 B., Holben, B. N., Kaufman, Y. J. Rasmussen, R. A., and Setzer, A. W. 1992.”
26 Smoke and fire characteristics for cerrado and deforestation burns in Brazil: Base-
27 B experiment.” *Journal of Geophysical Research* 97: 14,601–14,619.
28
29
30
31
32

33
34
35 Wooster, M. J., Roberts, G., Perry, G. L. W., Kaufman, Y. J. 2005. “Retrieval of
36 biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP
37 derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire
38 radiative energy release.” *Journal of Geophysical Research* 110: D24311.
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

59
60

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

Jimenez, J.L., Adachi, K., Buseck, P.R., Hall, S.R., Shetter, R. 2009. "Emissions from biomass burning in the Yucatan." *Atmospheric Chemistry and Physics* 9: 5785–5812.

For Peer Review Only

Table 1

	CO ₂	CO	CH ₄	NO _x	NH ₃	SO ₂	BC	OC	PM _{2.5}	PM ₁₀
Tropical forest	1643	93	5.07	2.55	1.3 3	0.4	0.5 2	4.71	9.1	18.5
Shrubland	1686	63	1.94	3.9	0.5 2	0.48	0.3 7	2.62	7.17	
Grassland	1548	135	8.71	0.75	1.4 7	0.32	0.9 1	9.64	14.8	28.9
Cropland	1585	102	5.82	3.11	2.1 7	1.17 ^a	0.7 5	2.3	6.26	8.44 ^a

^a Values from McCarty (2011)

Table 2

Month	AOD ₅₀₀	σ_{AOD}	$\alpha_{440-870}$	$\sigma_{\alpha_{440-870}}$	PW	σ_{PW}	N
JAN	0.145	0.075	1.49	0.19	2.3	0.41	86
FEB	0.181	0.087	1.5	0.12	2.25	0.42	98
MAR	0.234	0.086	1.52	0.17	2.59	0.56	90
APR	0.559	0.402	1.65	0.16	2.75	0.49	102
MAY	0.717	0.397	1.65	0.2	3.19	0.45	94
JUN	0.262	0.172	1.25	0.34	3.63	0.43	71
JUL	0.186	0.065	1.02	0.31	3.67	0.39	67
AUG	0.192	0.081	1.08	0.33	3.79	0.37	65
SEP	0.169	0.069	1.23	0.29	3.94	0.27	64
OCT	0.191	0.11	1.34	0.23	3.41	0.66	56
NOV	0.168	0.066	1.5	0.26	2.57	0.7	80
DEC	0.14	0.051	1.5	0.15	2.46	0.39	86
YEAR	0.262	0.182	1.39	0.21	3.05	0.62	959

Table 3

	CO ₂	CO	SO ₂	BC	OC	PM _{2.5}	PM ₁₀
Belize	0.10±0.03	7.23±2.16	0.04±0.01	0.05±0.01	0.40±0.13	0.71±0.21	1.34±0.39
Guatemala	10.42±3.66	713.91±214.61	4.61±1.29	4.84±1.37	34.19±10.33	63.57±20.36	116.58±41.61
Campeche	4.54±1.84	265.72±114.93	1.52±0.71	1.62±0.77	12.45±5.80	24.68±11.08	48.00±22.49
Chiapas	1.65±0.59	102.93±35.02	0.96±0.21	0.72±0.21	3.34±2.31	7.64±4.01	12.51±9.09
Quintana Roo	2.07±0.98	120.28±55.97	0.68±0.31	0.72±0.33	5.57±2.26	11.11±5.14	21.51±9.88
Tabasco	0.30±0.23	18.35±13.80	0.14±0.11	0.12±0.09	0.72±0.53	1.52±1.12	2.77±2.04
Yucatán	2.36±1.40	151.78±89.30	0.88±0.53	0.99±0.56	7.68±4.53	14.36±8.51	25.50±15.61

Note: CO₂ reported in Tg yr⁻¹

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60



Figure 1. Map of the Mexican territory. The zoom box shows the AERONET site in Tuxtla Gutierrez Chiapas. The gray areas show regions affected by fires.

886x629mm (72 x 72 DPI)

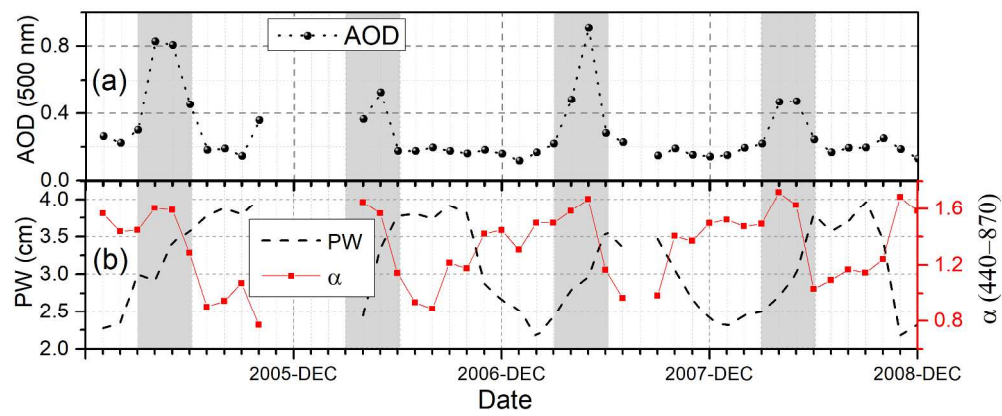


Figure 2. Time series of Aerosol Optical Depth (AOD500), $\alpha(440-870)$ and precipitable water (PW) of Level 2 direct sun measurements carried out from January 2005 to December 2008.

1004x421mm (72 x 72 DPI)

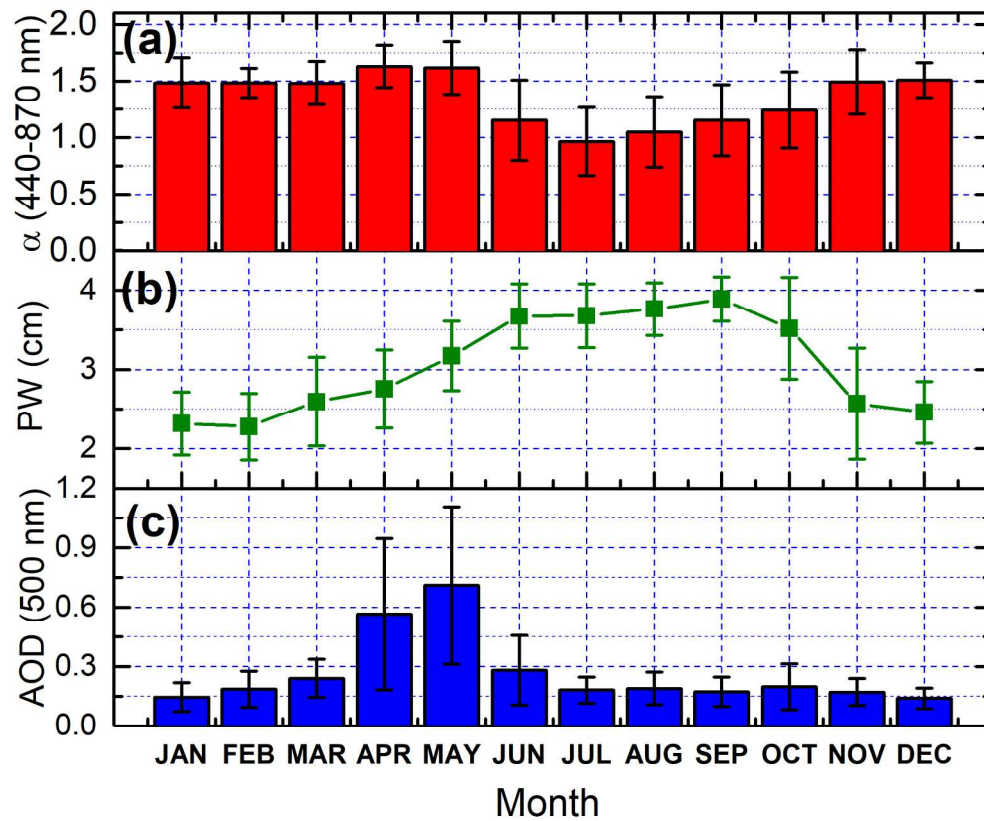


Figure 3. Monthly mean of Level 2 direct sun measurements over Tuxtla Gutierrez (AERONET) site for (a) Ångström exponent ($\alpha_{440-870}$), (b) Precipitable Water (PW, Level 1.5) and (c) Aerosol Optical Depth (AOD) at 500 nm from January 2005 to December 2009.

772x640mm (72 x 72 DPI)

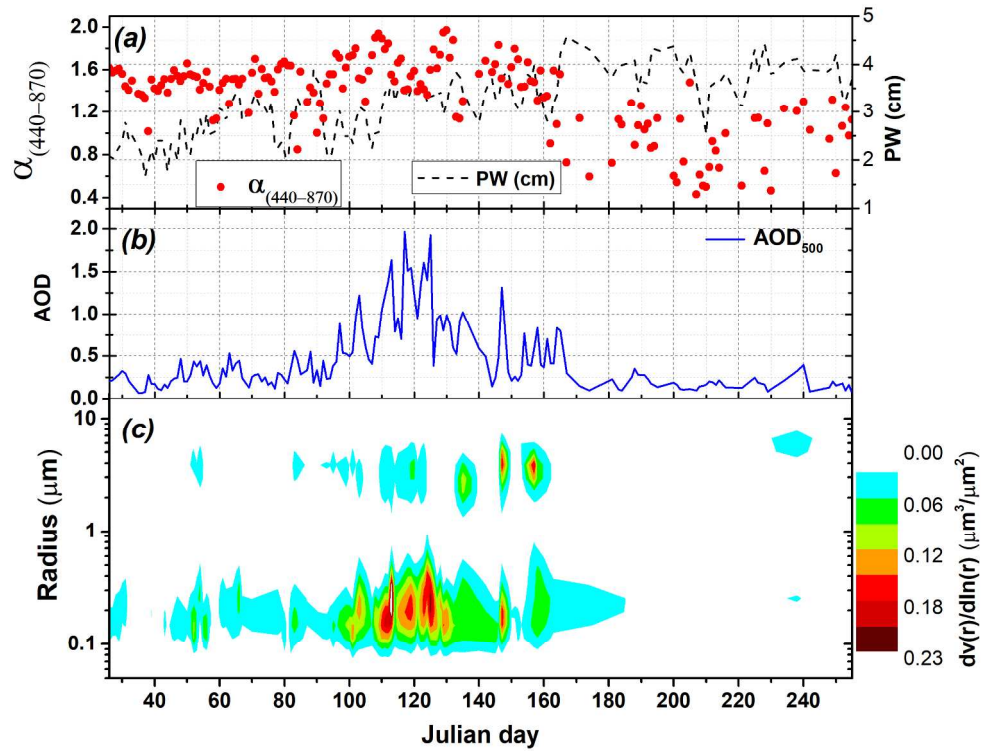


Figure 4. Aerosol optical measurements in the year 2005: (a) Angstrom exponent α (440-870 nm) and precipitable water (PW). (b) Aerosol optical depth in 500 nm and (c) aerosol size distribution.

941x707mm (72 x 72 DPI)

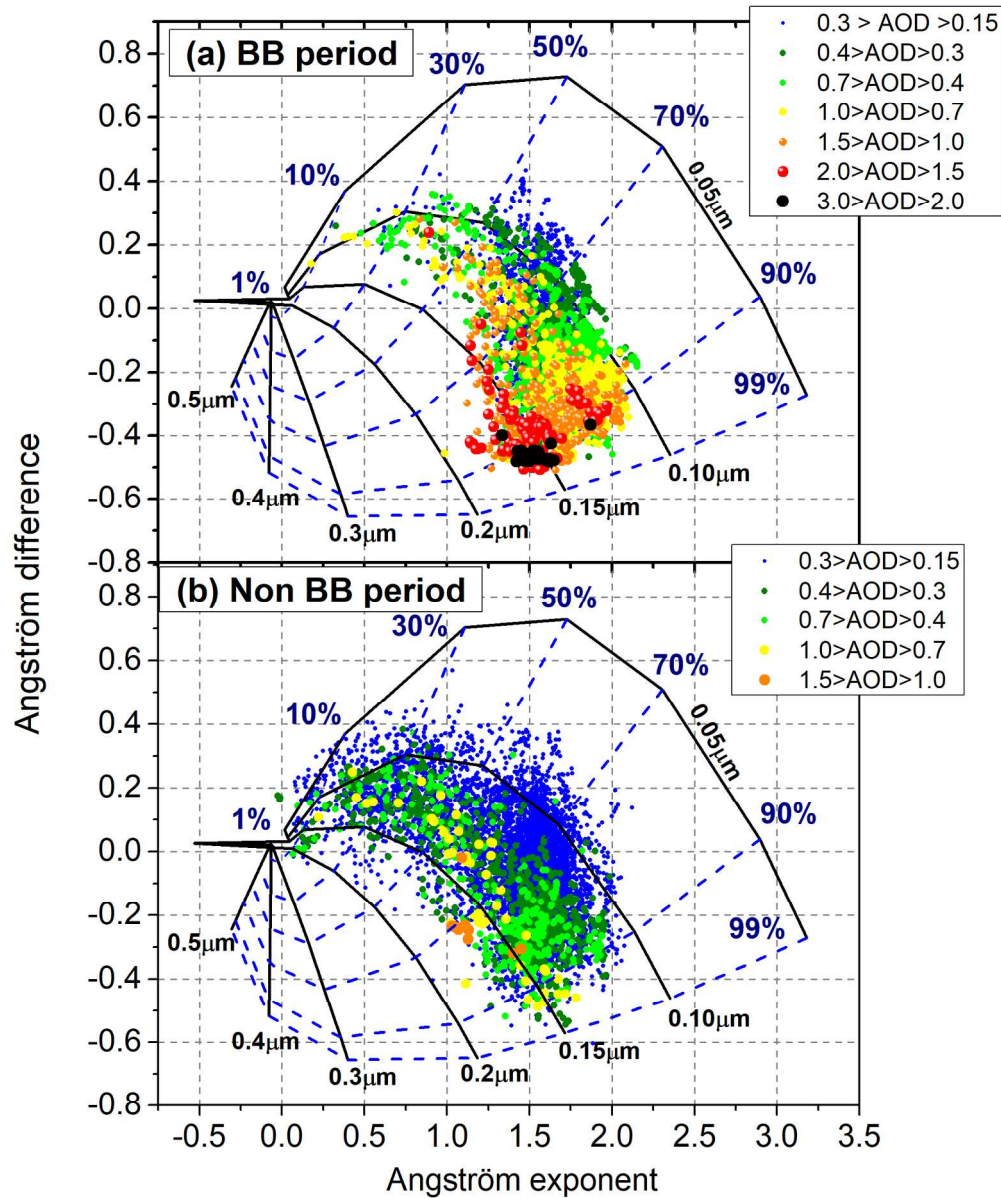


Figure 5. Ångström exponent difference, $da = a(440-675 \text{ nm}) - a(675-870 \text{ nm})$, as a function of $a(440-870 \text{ nm})$ and Aerosol Optical Depth (AOD)₆₇₅ in color-sized scale over Tuxtla Gutierrez, from January 2005 to December 2009 for two periods as follows: (a) BB months and (b) Non BB months. Black lines indicate the fixed fine-mode effective radius (R_f) and blue dashed lines indicate the fixed fraction (η) of fine-mode to AOD at 675 nm. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article).

731x875mm (72 x 72 DPI)

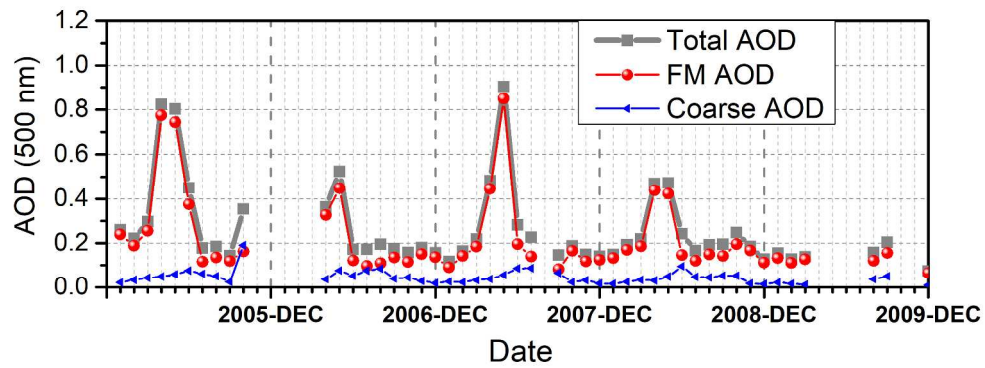


Figure 6. Spectral De-convolution Algorithm (SDA) retrievals of fine- (red dots) and coarse-mode Aerosol Optical Depth (AOD) (blue lines) at 500 nm from CIMEL data. Gray line represents total AOD values at 500 nm.

1163x429mm (72 x 72 DPI)

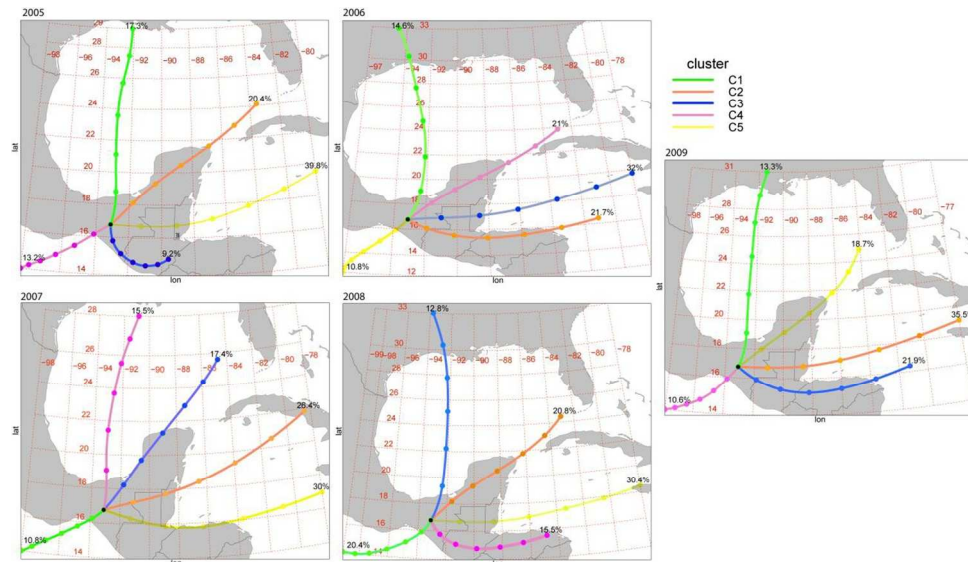


Figure 7. Cluster analysis computed annually trajectory pathways for March to May air masses ending over Tuxtla Gutierrez for the period 2005-2009.

155x87mm (220 x 220 DPI)

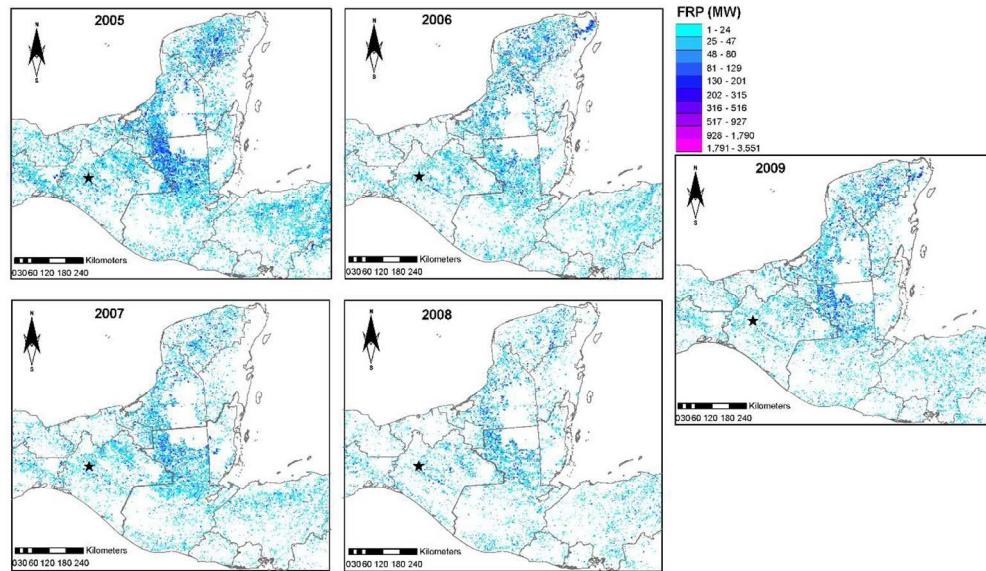


Figure 8. Spatial distribution of active fires over a 5-year period (2005 – 2009) in southeastern Mexico and northern Central America during biomass burning season.

155x90mm (220 x 220 DPI)

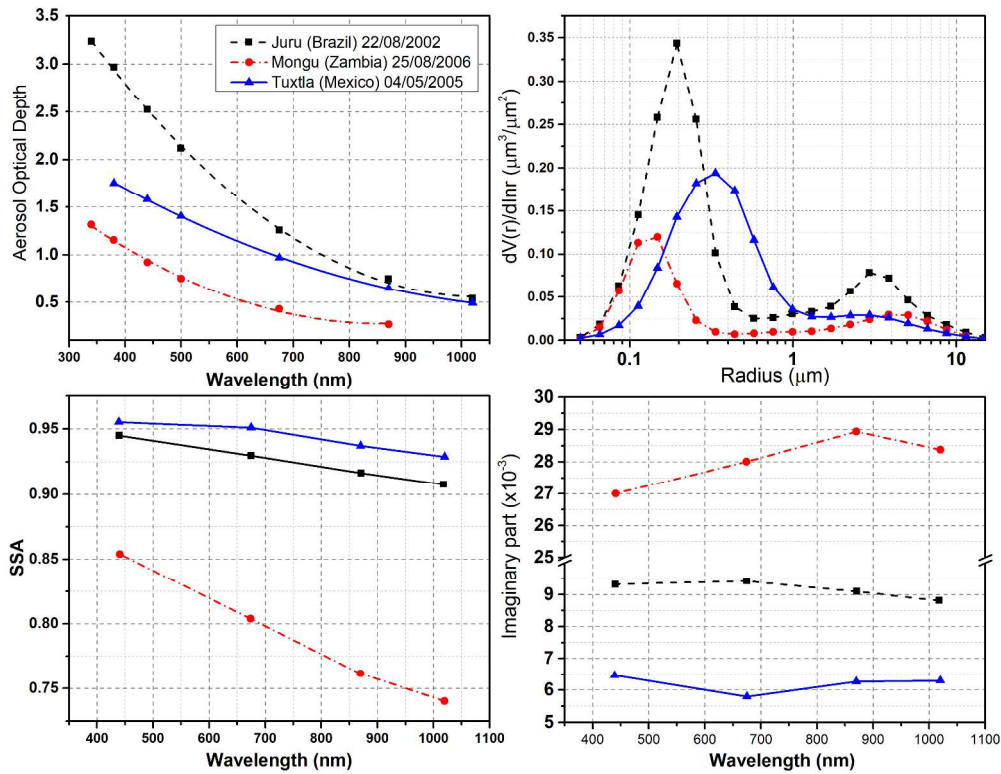


Figure 9. (a) AOD wavelength dependence, (b) aerosol size distribution, (c) Single scattering albedo and (d) imaginary refractive index for the three regions with biomass burning events: Juru (Brazil), Mongu (Zambia) and Tuxtla Gutierrez (Mexico).

1162x896mm (72 x 72 DPI)